

Ivan Guliš

OBNOVLJIVOST REZULTATA MJERENJA DUBINE BRAZDA NA ETALONIMA HRAPAVOSTI

ZAVRŠNI RAD

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

Mentor: Prof.dr.sc. Biserka Runje

Zagreb, veljača 2011.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA:	2
POPIS TABLICA.....	4
SADRŽAJ	5
UVOD	6
1. PREGLED OSNOVNIH KARAKTERISTIKA BAŽDARNIH ETALONA HRAPAVOSTI RAZVIJENIH U LFSB-U	7
2. MJERNE METODE I UREĐAJI U NANOMJERITELJSTVU.....	14
2.1 MJERNA OPREMA NA KOJOJ SU MJERENI REFERENTNI ETALONI HRAPAVOSTI	15
2.1.1. ELEKTRIČKO MEHANIČKI UREĐAJ S TICALOM.....	16
2.1.2. PERTHOMETER S8P	18
2.2. INTERFERENCIJA SVIJETLOSTI	20
2.2.1. INTERFERENCIJSKA METODA MJERENJA DUBINE BRAZDE D.....	21
<i>Epival - Interphako</i>	26
2.2.2. ZYGO NEW VIEW 600	28
2.3 POLARIZACIJSKA METODA MJERENJA DEBLJINE SiO_2 SLOJA.....	31
2.3.1. ELIPSOMETAR AUTOEL IV	40
2.4. AFM (MIKROSKOP ATOMSKIH SILA)	45
2.4.1. TERMO MIKROSKOP „AUTOPROBE CP“	47
2.4.2. TAYLOR HOBSON „TALYSTEP1“	48
3. MJERENJA DUBINE BRAZDI NA ETALONIMA HRAPAVOSTI LFSB-A.....	49
4. OBNOVLJIVOST REZULTATA MJERENJA	56
5. ZAKLJUČAK DONESEN NA TEMELJU REZULTATA STVARNIH MJERENJA ETALONA HRAPAVOSTI.....	86
6. LITERATURA	88

POPIS SLIKA:

Slika 1.1. Formiranje sloja SiO_2 na Si pločici	8
Slika 1.2. Postupak dobivanja brazde u sloju SiO_2 na silicijskoj pločici.....	10
Slika 1.3. Mjerne površine	11
Slika 1.4. Mjerna površina sa slijedom pravokutnih brazdi	12
Slika 1.5. Mjerna površina sa tri široke brazde	13
Slika 2.1. Konstrukcija uređaja s ticalom	17
Slika 2.1.1. Perthometer S8P	19
Slika 2.2.1. Sinusoidni val.....	20
Slika 2.2.2. Refleksija svjetlosti na pozlaćenim mjernim površinama	21
Slika 2.2.3. Prikaz dvostruko poprečno zamaknute slike brazde nakon razdvajanja Shearingovom metodom.....	23
Slika 2.2.4. Pruge interferencije.....	25
Slika 2.2.5. Interferencijski mikroskop Epival – Interphako	26
Slika 2.2.6. Optička shema mikroskopa Epival – Interphako	27
Slika 2.2.7. Zygo“New View 600“	28
Slika 2.3.1. Shematski način prikazivanja nepolariziranog vala svjetlosti	31
Slika 2.3.2. a) Ortogonalni međusobno koherentni linearno polarizirani valovi i rezultantni linearno polarizirani val zakrenute ravnine vibracije	32
b) Uobičajeni način prikazivanja linearno polariziranog vala.....	32
Slika 2.3.3. a) Ortogonalni linearno polarizirani valovi jednakih amplituda pomaknuti u fazi za $\lambda/4$ i rezultantni kružno polarizirani val	33
b) Uobičajeni način prikazivanja kružno polariziranog vala.....	33
Slika 2.3.4. a) Ortogonalni linearno polarizirani valovi različitih amplituda, pomaknuti u fazi i rezultantni eliptično polarizirani val	34
b) Uobičajeni način prikazivanja eliptično polariziranog vala	34
Slika 2.3.5. Projekcija eliptično polariziranog vala svjetlosti.....	34
Slika 2.3.6. Poincaréova kugla	35
Slika 2.3.7. Stanja polarizacije prikazana na Poincaréovoj kugli	36
Slika 2.3.8. Djelomično polarizirano svjetlo.....	36
Slika 2.3.9. Polarizacija refleksijom	37
Slika 2.3.10. Polarizacija refleksijom i transmisijom.....	38

Slika 2.3.13. Elipsometar AutoEL IV	43
Slika 2.4.1. AFM	45
Slika 2.4.2. Prikaz mjerenja AFM-om	46
Slika 2.4.3. Termo Mikroskop „Autoprobe CP“	47
Slika 2.4.4. Taylor Hobson „Talystep1“	48
Slika 3.1. Rezultati mjerenja dubine brazde etalona 6-2G	49
Slika 3.2. Rezultati mjerenja dubine brazde etalona 4-H	50
Slika 3.3. Rezultati mjerenja dubine brazde etalona YR06507	51
Slika 3.4. Rezultati mjerenja dubine brazde etalona 6-2M.....	52
Slika 3.5. Rezultati mjerenja dubine brazde etalona 3-2M.....	53
Slika 3.6. Rezultati mjerenja dubine brazde etalona 1x17402	54
Slika 3.7. Rezultati mjerenja dubine brazde etalona 3-2K	55
Slika 3.8. Analiza rezultata mjerenja etalona hrapavosti.....	86

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva silicija i silicij-dioksida	7
Tablica 2. Nazivne dimenzijske karakteristike niza baždarnih etalona hrapavosti LFSB	13
Tablica 3. Osnovni podaci o uređaju Perthometer S8P	18
Tablica 4. Tehničke karakteristike sistema NewView 600	29
Tablica 5. Tehničke karakteristike dodataka NewView 600	29
Tablica 6. Tehničke karakteristike osobina NewView 600	30
Tablica 7. Osnovne osobine Autoprobe CP	47
Tablica 8. Aritmetičke sredine i standardna odstupanja sedam etalona hrapavosti ..	57

SADRŽAJ

Ovaj rad govori o obnovljivosti rezultata mjerenja dubine brazde na etalonima hrapavosti LFSB-a.

U prvom dijelu rada dat je pregled osnovnih karakteristika referentnih etalona hrapavosti koji su razvijenu u LFSB-u. Taj dio govori kakvom su tehnologijom izrađeni ti etaloni, sam postupak dobivanja brazde na silicijskoj pločici te o mjernim površinama koje su važne jer se na svakoj od tih površina vrši određeno mjerenje.

Nakon toga su prikazane mjerne metode i uređaji u nanomjeriteljstvu.

Nakon osnovnog dijela dat je pregled mjernih metoda i uređaja koji su nama važni jer su na njima mjereni referentni etaloni hrapavosti. Za mjerenje smo koristili elektroničko mehanički uređaj s ticalom (Perthometar S8P), interferenciju svjetlosti, polarizacijsku metodu te mikroskop atomskih sila. Svaka metoda i uređaj detaljnije su opisani.

U završnom dijelu rada su prikazani stvarni rezultati mjerenja dubine brazdi na sedam etalona hrapavosti. Na temelju donesenih rezultata mjerenja, sukladno zahtjevima norme ISO 5725 prikazana je analiza mjerne ponovljivosti i obnovljivosti za svaki referentni etalon hrapavosti. Na kraju je zaključak koji je donesen na temelju tih rezultata mjerenja. U zaključku se nalazi analiza mjerenja stvarnih rezultata te sama poboljšanja koja treba ostvariti.

UVOD

Mjerno jedinstvo je takvo mjeriteljsko stanje u kojem su mjerni rezultati izraženi u zakonitim jedinicama koji se mogu s utvrđenim mjernim nesigurnostima dovesti u vezu s referencijskim etalonima. Mjerno jedinstvo kao takvo ima svoje sastavnice koje su bitne a to su: međunarodni sustav jedinica SI, etaloni, umjeravanje, sljedivost i mjeriteljska infrastruktura.

Mjerno jedinstvo se osigurava etalonima ali značajne poteškoće u osiguravanju mjernog jedinstva u nanotehnologiji stvara veliki broj mjernih metoda i uređaja koji rade na različitim mjernim principima i mjernim mogućnostima s obzirom na mjerna područja i rezolucije.

Dalje ćemo spomenuti sljedivost i umjeravanje. Te sastavnice su također jako važne za postizanje mjernog jedinstva u nanotehnologiji.

Sljedivost je svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti etalona po kojemu se on može dovesti u vezu sa navedenim etalonima, (obično su to državni ili međunarodni etaloni) neprekinutim lancem usporedba koje imaju utvrđene mjerne nesigurnosti. Ta sljedivost je kod nanomjeriteljstva veliki problem jer u prvom redu, nemoguće je postojeći sustav sljedivosti i umjeravanja koji je utemeljen na etalonima i metodama koji se koristi u makrosustavima u potpunosti prenijeti u nanomjeriteljske sustave. Etaloni koji su važeći danas, redom su svi nastali minijaturizacijom etalona makro skala.

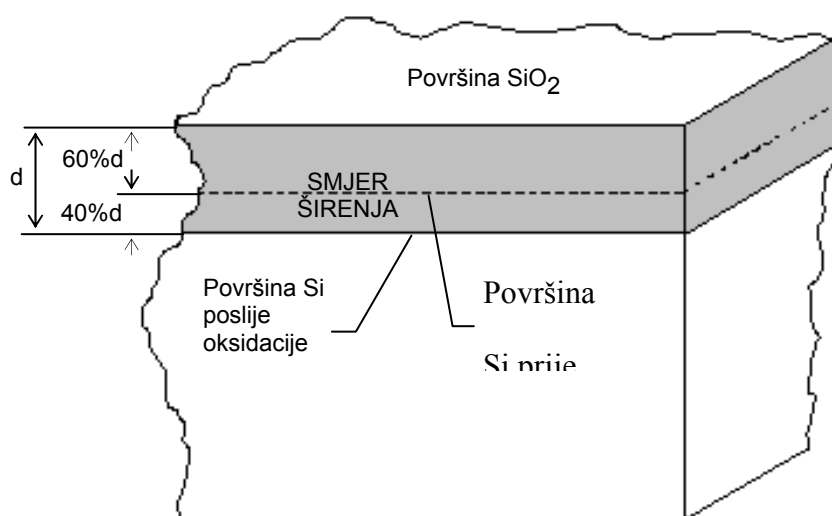
1. PREGLED OSNOVNIH KARAKTERISTIKA BAŽDARNIH ETALONA HRAPAVOSTI RAZVIJENIH U LFSB-u

Baždarni etaloni hrapavosti izrađeni su tehnologijom koja se primjenjuje u izradi integriranih krugova u elektroničkoj industriji. Kao polazni materijal upotrijebljena je monokristalna struktura silicija u obliku silicijske pločice (wafer) sa slojem silicij-dioksida. Česta primjena silicija u elektroničkoj industriji uvjetovana je povoljnim poluvodičkim svojstvima silicija i silicij-dioksida. Neka svojstva silicija i silicij-dioksida prikazana su u (tablici 1.).

Tablica 1. Svojstva silicija i silicij-dioksida

SVOJSTVO	SILICIJ Si	SILICIJ-DIOKSID SiO ₂
Atomski broj	14	
Relativna atomska ili molekularna masa	28,08	60,08
Atomska ili molekularna gustoća, cm ⁻³	5,0·10 ²²	2,3·10 ²²
Kristalna struktura	dijamant	SiO ₄ , tetraedar veza 50% kovalentna 50% ionska
Intrinzična pokretljivost cm ² V ⁻¹ s ⁻¹ Elektroni Šupljine	1350 480	Izolator ρ=10 ¹⁶ Ωcm pri T=300 K
Relativna dielektričnost	11,7	3,9
Talište °C	1415	1700
Specifični toplinski kapacitet Jg ⁻¹ K ⁻¹	0,7	1,0
Toplinska provodnost Wcm ⁻¹ K ⁻¹	1,5	0,014
Temperaturna difuznost cm ² s ⁻¹	0,9	0,006
Linearni koeficijent toplinskog rastezanja K ⁻¹	2,5·10 ⁻⁶	0,5·10 ⁻⁶

Postupak dobivanja sloja SiO_2 na silicijskoj pločici vrši se u pećima za termičku oksidaciju Si na temperaturi od 700 do 1250°C. Silicijske pločice se stavljaju u kremenu cijev peči za oksidaciju, pri čemu se u cijev dovodi suhi kisik ili vodena para. Oksidacija u suhom kisiku vrši se do dubine sloja SiO_2 od 1 μm . Za veće dubine sloja vrši se oksidacija u vodenoj pari. Formiranje sloja SiO_2 na silicijskoj pločici prikazano je na (slici 1.1.).



Slika 1.1. Formiranje sloja SiO_2 na Si pločici

Na račun Si na međuplohi Si- SiO_2 raste oksidni sloj. Oksidirajuće čestice difundiraju kroz već nastali sloj silicij-dioksida i na međuplohi reagiraju sa silicijem. Adhezijski sloj vrlo čvrsto pirjanja po cijeloj površini monokristala silicijske pločice, gdje se debljina SiO_2 ostvaruje sa 40% prodorom u dubinu ispod površine monokristala silicija, a 60% rastom iznad te površine.

Na početku oksidacije brzina rasta oksida je veća, ali se s trajanjem oksidacije (sve većom debljinom oksida) smanjuje. S povišenjem temperature brzina oksidacije raste. Tako dobiven sloj SiO_2 na Si pločici ima čitav niz povoljnih svojstava u izradi vrhunskih etalona hrapavosti.

1. Velika tvrdoća sloja (povoljna za metodu dodira)

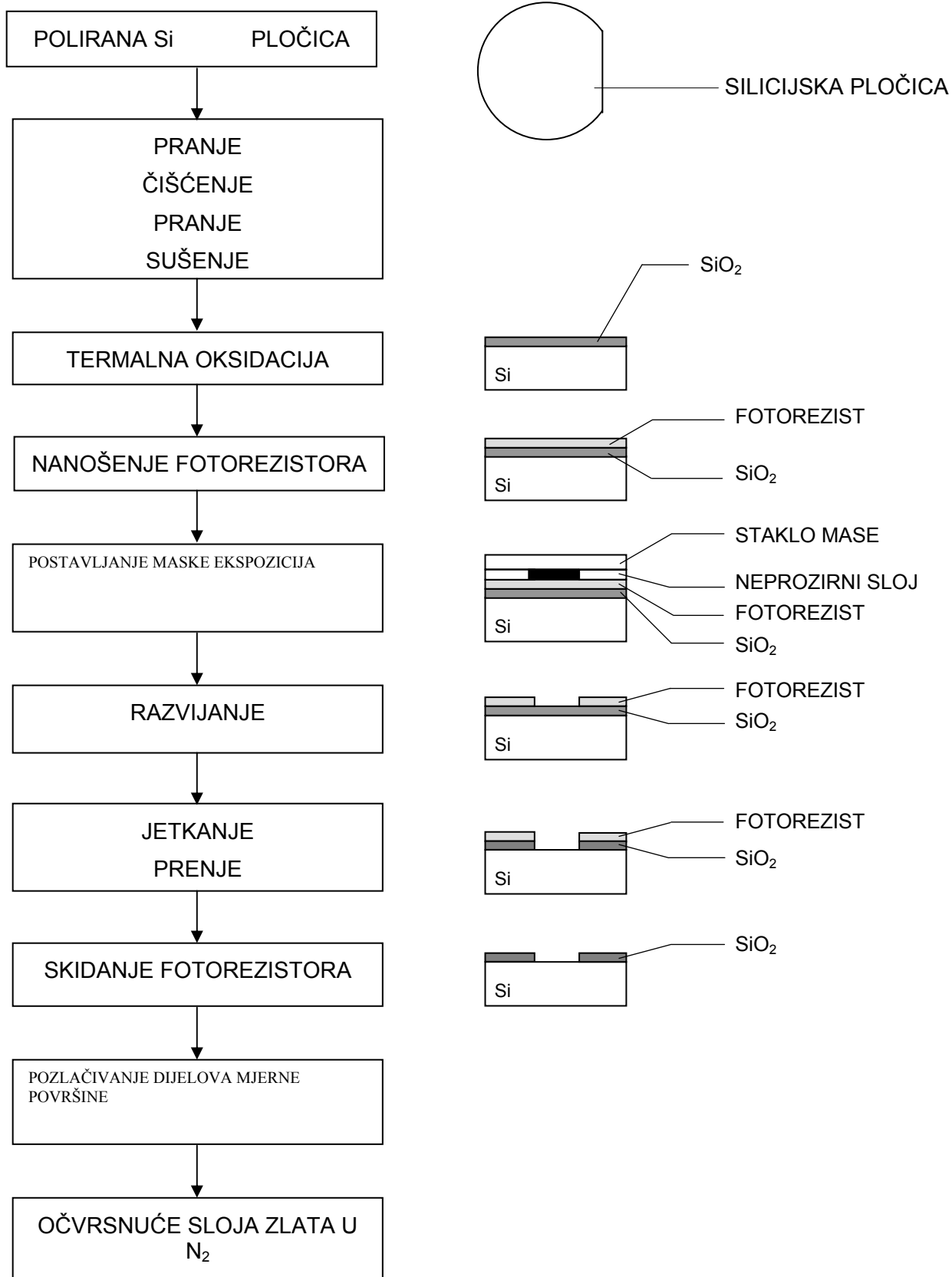
- tvrdoća silicijskog sloja: 1223±30,3 HV
- tvrdoća silicij-dioksida: 1360±90,1 HV

Za površinu etalona za podešavanje uređaja s ticalom zahtijeva se tvrdoća veća od 750 HV.

2. Jednolik i kontinuiran rast sloja s obzirom na površinu silicija.
3. Čvrsto prijanjanje sloja SiO_2 na cijeloj površini.
4. Dobivanje glatke površine sloja SiO_2 .
5. Jednostavno dobivanje debljine sloja.
6. Termički koeficijent SiO_2 sloja sličan termičkom koeficijentu Si sloja.
7. Mogućnost dobivanja brazda kemijskim nagrizanjem bez prodiranja u sloj osnovnog materijala Si.

Postupak dobivanja brazde u sloju SiO_2 na silicijskoj pločici

Na dobiveni oksidni sloj SiO_2 nanosi se jednoličan sloj fotorezistora (fotosenzibilni sloj). Sloj fotorezistora, debljine oko 0,6 μm suši se specijalnom otopinom u plinovitom stanju na temperaturi od 120°C, čime se ujedno dobiva jednolika površinska napetost emulzije. Na očvrnuti sloj postavlja se maska i tako složen set prosvjetljava se paralelnim snopom plave svjetlosti. Svjetlost uzrokuje polimerizaciju na osvijetljenim površinama fotorezistora. Razvijanjem se osjetljivi dio sloja fotorezistora učvrsti, a neosvijetljeni otopi. Da bi se dobio dovoljno čvrst razvijeni fotorezistorski sloj, on se peče na temperaturi od 130 do 260°C što ovisi o upotrijebljenom fotorezistoru. Nezaštićeni dio sloja SiO_2 jetka se smjesom NH_4F - H_2O -HF bilo u tekućem stanju ili u obliku paste. Jetkanjem se prodire samo do čistog Si sloja. Nakon faze jetkanja odstranjuje se preostali fotorezistorski sloj specijalnom zagrijanom otopinom. Završna operacija je pozlaćivanje dijela mjerne površine, što se vrši napanjanjem zlata u vakuumu. Očvrsnuće sloja zlata vrši se u dušiku pri temperaturi od 430°C. Postupak dobivanja brazde u sloju SiO_2 na silicijskoj pločici shematski je prikazan na (slici 1.2.).

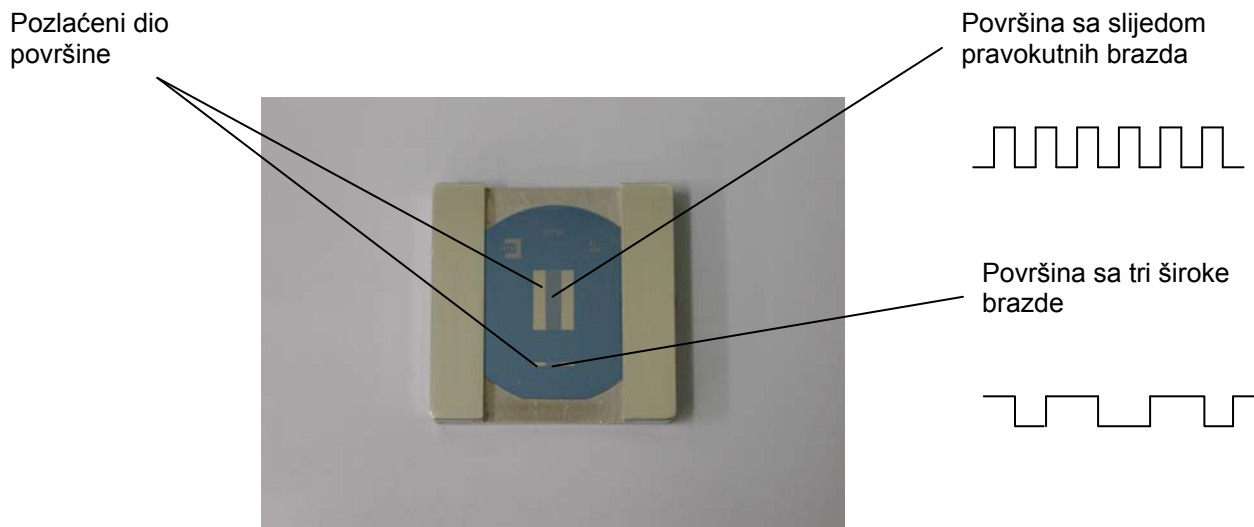


Slika 1.2. Postupak dobivanja brazde u sloju SiO_2 na silicijskoj pločici

Mjerne površine

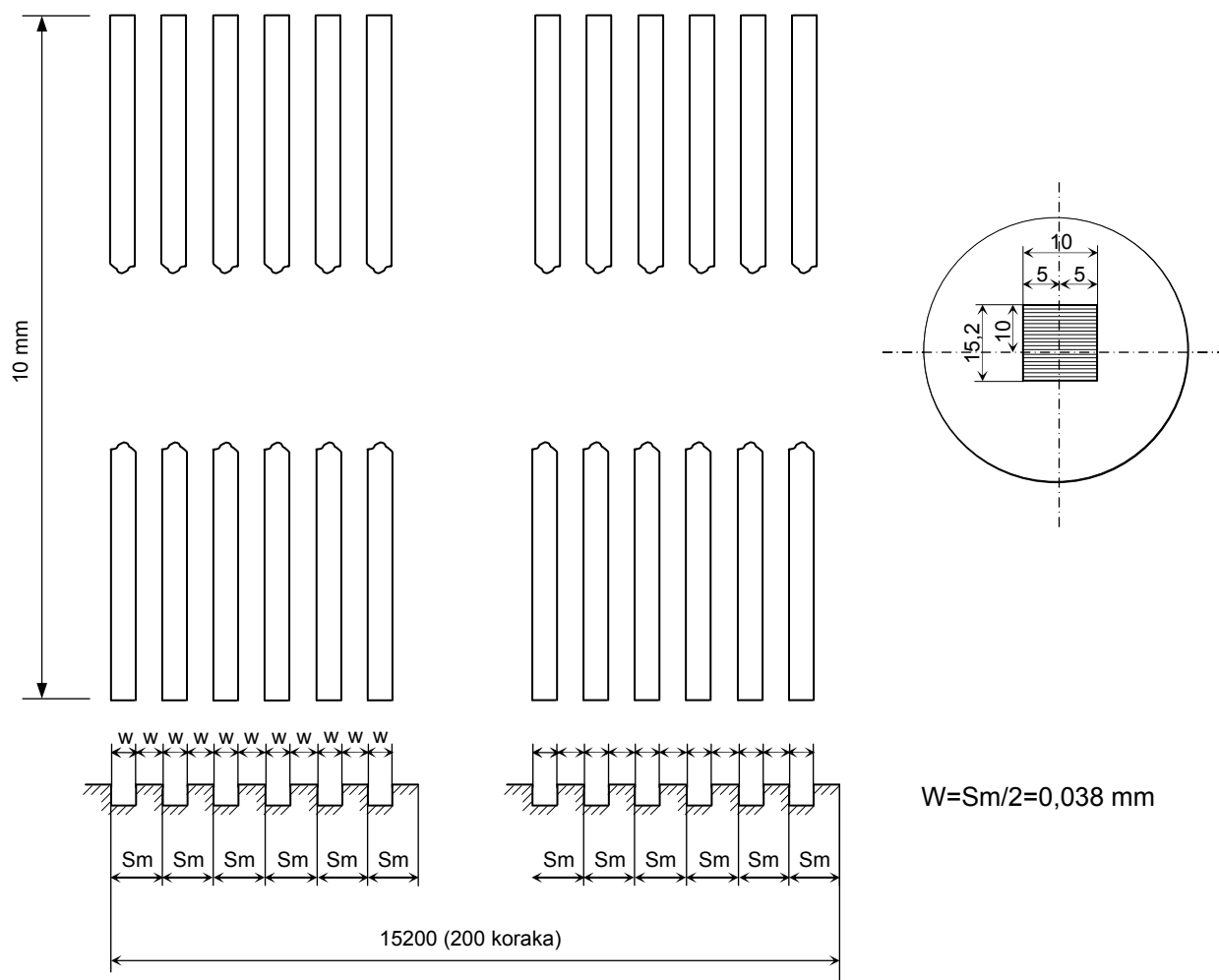
Na etalonima se nalaze dvije mjerne površine prikazane (slikom 1.3.)

- površina sa slijedom pravokutnih brazdi,
- površina sa tri pravokutne brazde od kojih je srednja najšira.



Slika 1.3. Mjerne površine

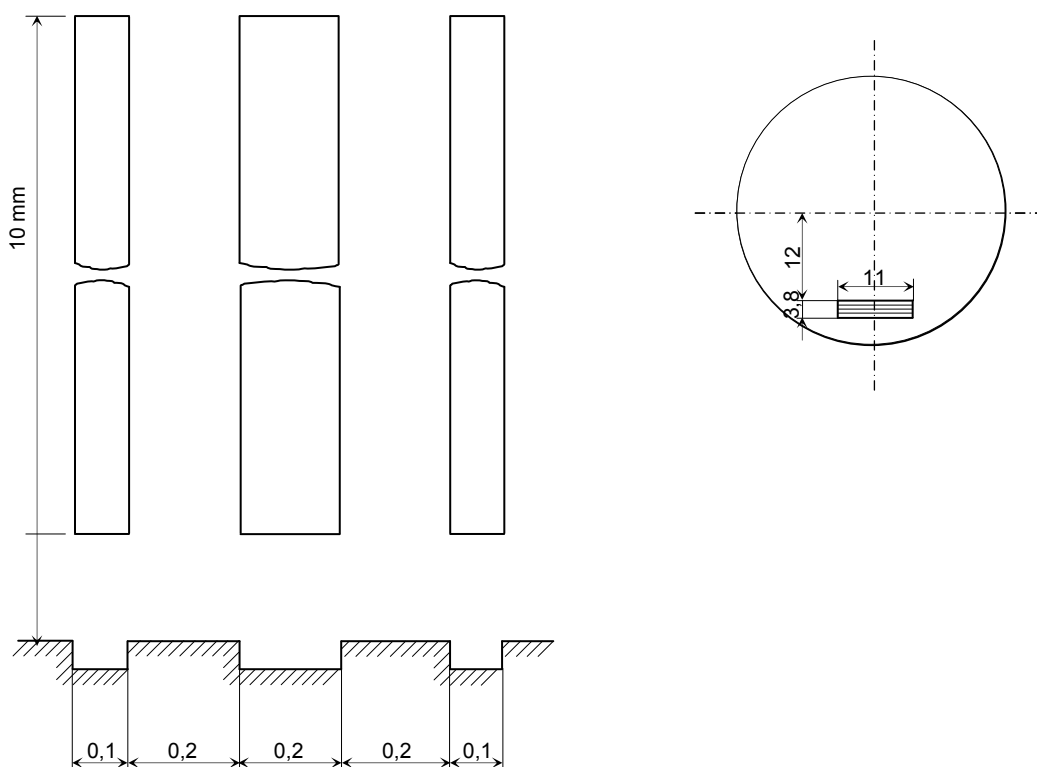
Mjerna površina sa slijedom pravokutnih brazdi (slika 1.4.) veličine je (15x10) mm. Središnji dio mjerne površine služi za baždarenje računalne jedinice mjernog uređaja, ukoliko je uređaj takav da se podešava etalom sa slijedom brazdi. Ona također služi za provjeru etalona koji je isporučen sa mjernim uređajem od strane proizvođača i koji služi za podešavanje uređaja. Sa svake strane mjerne površine nalazi se pozlaćeni sloj koji služi za interferencijska mjerenja dubine brazde d .



Slika 1.4. Mjerna površina sa slijedom pravokutnih brazdi

Mjerna površina sa tri široke pravokutne brazde smještena je unutar pravokutnika obrubljenog uskom brazdom, a služi za baždarenje uređaja koji se podešavaju etalonom sa samo jednom brazdom. Sa svake strane mjerne površine također se nalazi pozlaćen sloj koji omogućuje interferencijska mjerenja dubine brazde.

Mjerna površina sa tri široke brazde prikazana je na (slici 1.5.).



Slika 1.5. Mjerna površina sa tri široke brazde

Skupnom tablicom 2. prikazane su nazivne dimenzijske karakteristike niza baždarenih etalona hrapavosti LFSB.

Tablica 2. Nazivne dimenzijske karakteristike niza baždarnih etalona hrapavosti LFSB

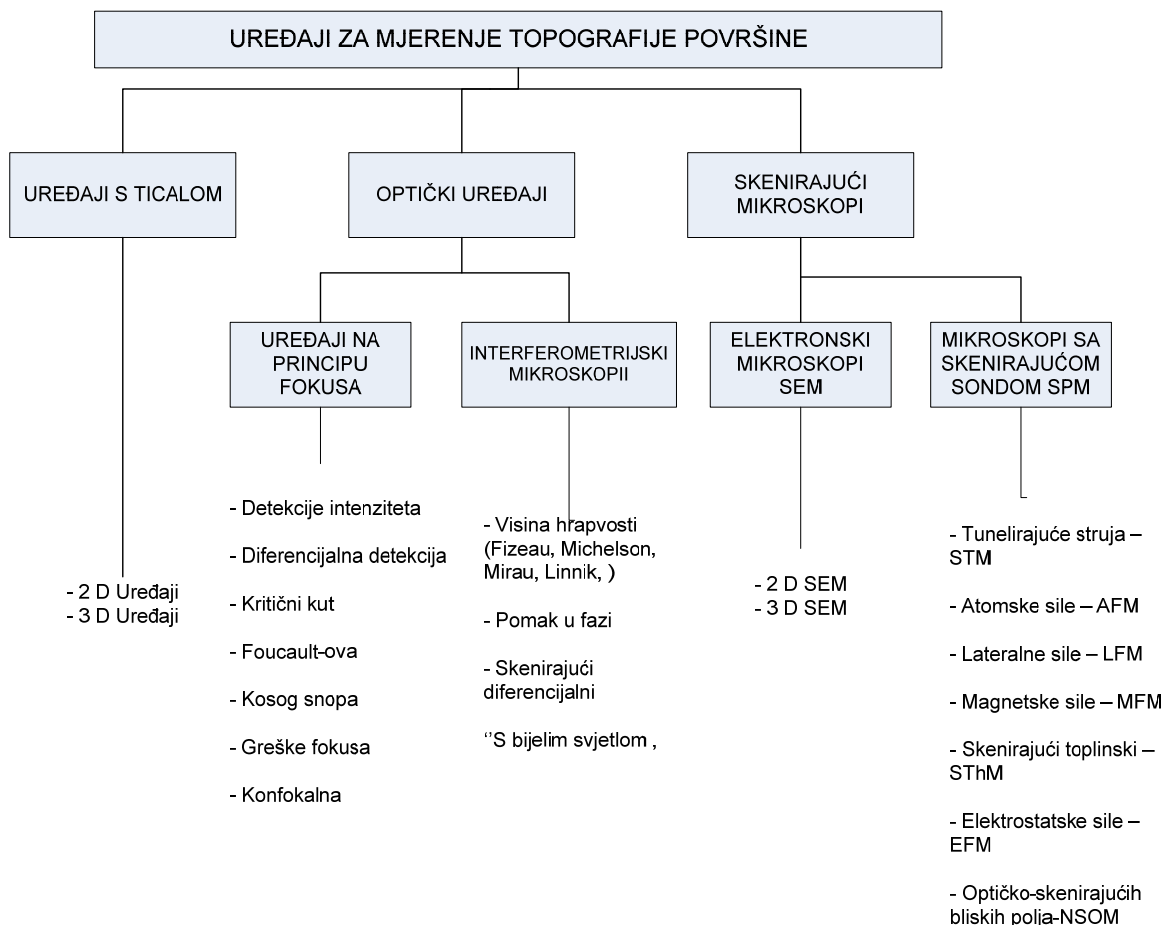
Broj etalona	Nazivna vrijednost $R_a \mu m$	Karakteristike pravokutnog profila			Dimenzija mjere površine	
		Dubina brazde $d \mu m$	Korak $s_m mm$	Širina brazde $w mm$	Dužina mm	Širina mm
1	0,025	0,050	0,076	0,038	10	6
2	0,050	0,100				
3	0,100	0,200				
4	0,200	0,400				
5	0,400	0,800				
6	0,800	1,600				
7	1,200	2,400				
8	1,600	3,200				

2. MJERNE METODE I UREĐAJI U NANOMJERITELJSTVU

Zbog određenih zahtijeva koji su u nanotehnologiji došlo je do razvoja metoda i uređaja koji mogu zadovoljiti tim zahtijevima. One se mogu podjeliti u sljedeće skupine:

- Interferometri pomaka
- Uređaji za ispitivanje nano topografije površine
- Mikro-koordinatni mjerni uređaji
- Ostale metode

Uređaji za ispitivanje nano topografije površine:



2.1 MJERNA OPREMA NA KOJOJ SU MJERENI REFERENTNI ETALONI HRAPAVOSTI

Za mjerenje referentnih etalona hrapavosti koristili smo:

- Električko mehanički uređaj s ticalom (Perthometer S8P)
- Interferenciju svjetlosti
- Polarizacijsku metodu
- AFM Mikroskop atomskih sila

U sljedećim poglavljima detaljnije ću opisati odabrane metode i uređaje koje samo koristili za mjerenje dubine brazda na sedam referentnih etalona hrapavosti LFSB-a.

2.1.1. ELEKTRIČKO MEHANIČKI UREĐAJ S TICALOM

Kod uređaja s ticalom igla ticala se pomiče konstantnom brzinom po površini i vertikalni pomak igle pretvara u električni signal pomoću pretvornika. Električni signal je pojačan i obrađen pomoću računala. Skeniranjem od točke do točke dobiva se kvantitativna informacija s obzirom na poziciju igle ticala .

Prednosti:

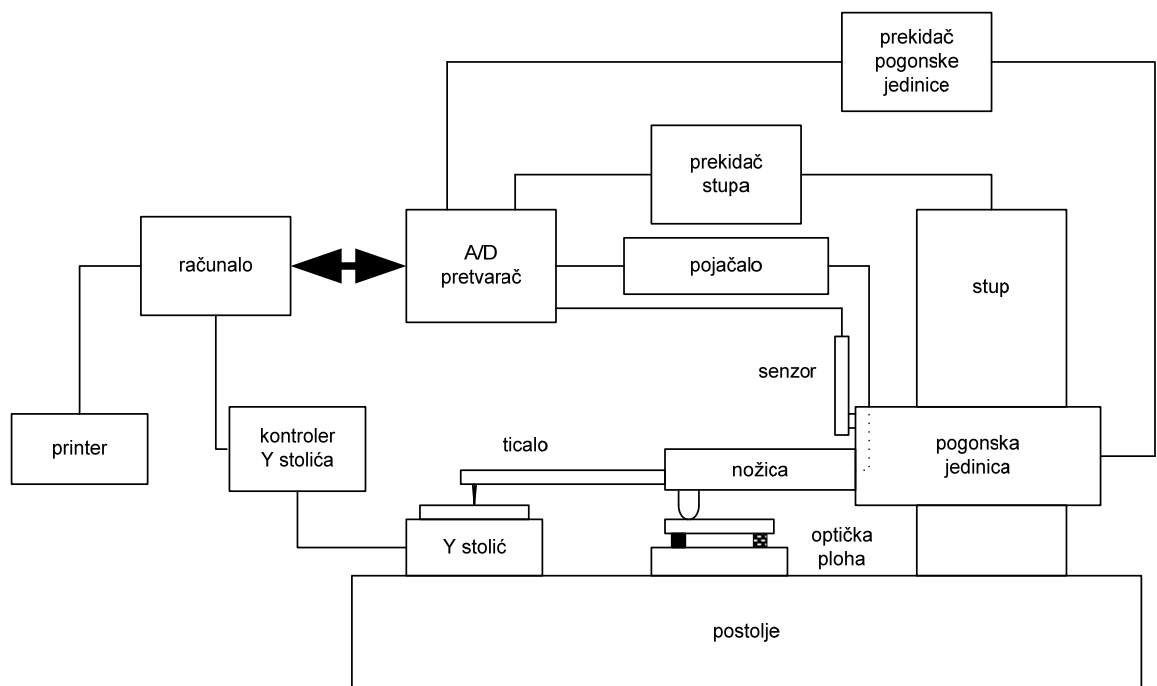
Mogu se ostvariti vrlo točna mjerenja kako u laboratorijskim tako i u industrijskim uvjetima s vertikalnim rasponom od nekoliko milimetara sa rezolucijom u nanometrima, s mogućnošću uzdužnog skeniranja preko 100 mm.

Nedostaci:

Oblik igle ticala kao i sustavi vođenja mogu znatno utjecati na točnost reprodukcije snimljenog profila. Osim toga sila pritiska uslijed ticala na površinu može izazvati plastične deformacije na površini (neupotrebljivi na mekim materijalima).

Konstrukcija sustava s ticalom

Na (slici 2.1.) je prikazana uobičajena konstrukcija sustava s ticalom. Računalo je upravljački centar koji kontrolira cijeli proces mjerenja. Translacija u smjeru X je ostvarena pomoću step, DC ili linearnog motora koji se nalazi u pogonskoj jedinici. Mjerna ravnina je ostvarena pomoću odnosa optičkoj plohe ispod nožice i Y stolića. Kako ticalo ide po površini uzorka, nožica pretvara mehaničko gibanje ticala u analogni signal koji se pojačava u pojačalu. Nakon toga analogni signal se digitalizira u A/D pretvaraču i proslijeđuje do računala. Na (slici 2.1.) nije prikazan nivelirajući uređaj koji može bit ručni ili upravljani motorom. Ako se uzorak loše nivelira rezultati mjerenja su netočni.



Slika 2.1. Konstrukcija uređaja s ticalom

2.1.2. Perthometer S8P

U Laboratoriju za precizna mjerenja dužina FSB-a se za ispitivanje hrapavosti površine koristi uređaj s ticalom Perthometer S8P, koji je prikazan na (slici 2.1.1.). Ovaj uređaj je prvenstveno namijenjen 2D mjerenju hrapavosti, odnosno ispitivanju profila i izračunavanju 2D parametara hrapavosti. Na ovome uređaju je moguće dobiti i prikaz topografije površine koji je dobiven rasterskim snimanjem više profila, međutim nije moguće izračunati 3D parametre hrapavosti. U (tablici 3.) navedeni su osnovni podaci o uređaju te su navedene njegove tehničke karakteristike.

Tablica 3. Osnovni podaci o uređaju Perthometer S8P

Proizvođač	Feinprüf Perthen GmbH, Njemačka
Tragovi	Od 4 do 128 sa 8064 točaka po tragu
Duljina očitavanja [mm]	0,56; 1,75; 5,6; 17,5; 56,0
Standardni mjerni putovi [mm]	0,4; 1,25; 4,0; 12,5; 40
Cut-off (granične valne dužine) [mm]	0,025; 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8,0
Mjerni opseg [μm]	±12,5μm, ±62,5μm, ±125μm, ±625μm, ±2500μm
Profili	D – direktni G – ispravljeni P – ispravljen bez početnog i završnog dijela W – valovitost R – hrapavost
Tip filtera	Gaussov filter, RC filter, osni filteri (cut-off kod 75% i 50%)

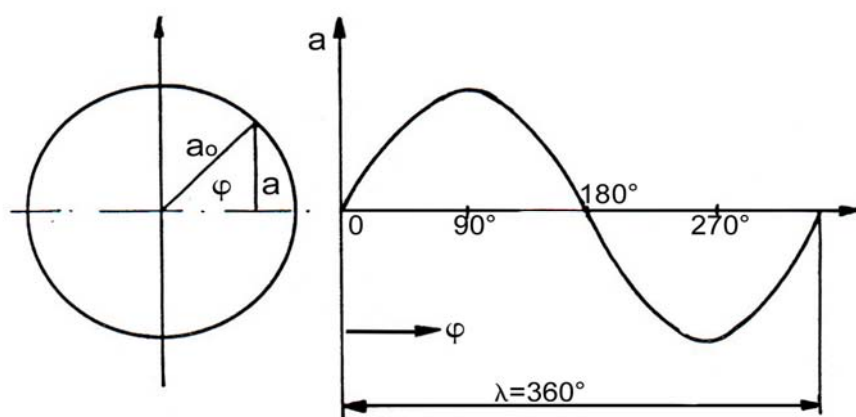


Slika 2.1.1. Perthometer S8P

2.2. INTERFERENCIJA SVIJETLOSTI

Interferencija je tipična valna pojava pomoću koje se i prepoznala valna priroda elektromagnetskih valova posebno svjetlosti.

Kao takva, interferencija svjetlosti je međusobno djelovanje svjetlosnih tokova iz najmanje dva izvora koji uzrokuju pojačanje ili slabljenje intenziteta rezultantnog vala. Pri tome razlikujemo dvije važne veličine, amplitudu i fazu. Amplituda vala predstavlja maksimalni otklon od nultog položaja, dok se udaljenost između najbližih točaka koje imaju istu fazu titranja naziva valnom duljinom. Ona odgovara razlici faza od 360° i prikazana je na (slici 2.2.1.).



Slika 2.2.1. Sinusoidni val

Da bi se opazila pojava interferencije, oba svjetlosna vala trebaju biti koherentna, tj. moraju zadovoljavati slijedeće uvjete:

- svjetlosni valovi trebaju interferirati istovremeno u području promatranja,
- pomaci faza moraju biti stalni u dovoljno dugom vremenskom periodu,
- valne duljine moraju biti iste,
- valovi se moraju gibati u istoj ravnini,
- u slučaju razmaknutih svjetlosnih izvora kut interferirajućih zraka mora biti malen.

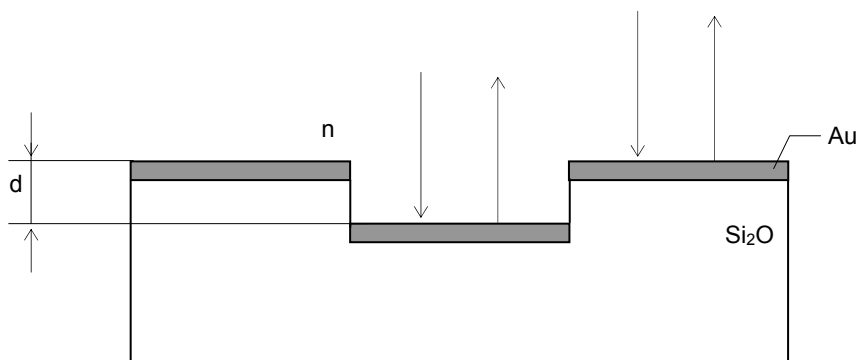
Ispunjenje prva dva uvjeta moguće je samo onda kada oba vala svjetlosti izlaze iz jedne te iste točke tj. jednog izvora i kada su razlike hoda malene. Dakle da bi se uopće dobila interferencija mora se na neki način osigurati dva koherentna vala. To se postiže na više načina, a pri tome se koriste dvije metode.

1. Dva koherentna vala dobiju se dijeljenjem valne fronte tj. uzimanjem jednog dijela valne fronte za jedan val, a drugog dijela za drugi val. Na tom principu zasniva se Joungov pokus, Fresnelova biprizma, Fresnelova zrcala, Lloydova zrcala i dr.

2. Dva koherentna vala dobiju se djelomičnom refleksijom i djelomičnom transmisijom. Primjer je interferencija na tankom slojevima. Uređaji koji rade na tom principu su interferometri pomaka poznati kao Michelson, Mach-Zehnder, Jamin, Fabri Perot i dr.

2.2.1. Interferencijska metoda mjerenja dubine brazde d

Dubina brazde d na etalonima hrapavosti mjerena je interferencijskim mikroskopom EPIVAL - INTERPHAKO primjenom interferencije svjetlosti, ostvarene refleksijom na pozlaćenim mjernim površinama (slika 2.2.2.).



Slika 2.2.2. Refleksija svjetlosti na pozlaćenim mjernim površinama

Zrake svjetlosti padaju pod kutom ($\varphi_0 \cong 0^\circ$) na pozlaćeni dio gornje i donje mjerne površine. Kako se refleksija svjetlosti odvija na istom materijalu (zlatu) to će fazni pomak na gornjoj i donjoj mjernoj površini brazde biti isti (fazni skok za zlato kod $\varphi_0 \cong 0^\circ$ iznosi $142,5^\circ$), te ga nije potrebno uzimati u obzir pri mjerenju dubine brazde. Kako pri refleksiji svjetlosti ne dolazi do razlike u faznom skoku, a sama refleksija se odvija u zraku $n_0 = 1$, uvjeti za maksimalno pojačanje odnosno slabljenje glase:

$$\text{maksimalno pojačanje: } \Delta L = 2d = m \times \lambda \quad (2.20.)$$

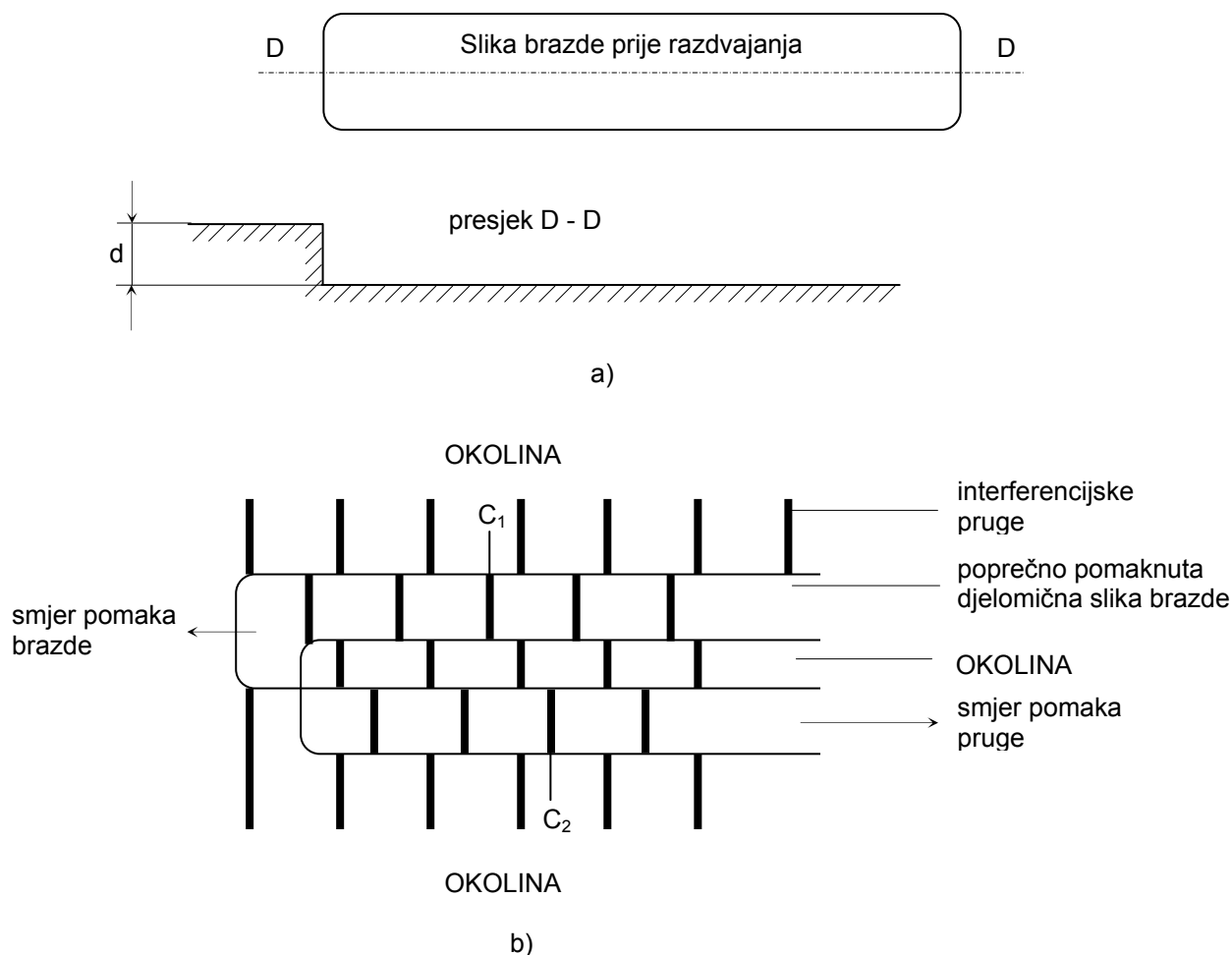
$$\text{maksimalno slabljenje: } \Delta L = 2d = (m + 1) \times \lambda/2 \quad (2.21.)$$

Mjerenje dubine brazde je izvršeno na pozlaćenoj mjernoj površini sa slijedom pravokutnih brazdi primjenom interferencijskog mikroskopa Epival - Interphako uz filter valne duljine $\lambda = \text{ nm}$ i Shearing postupak razdvajanja slike koji ćemo upravo objasniti.

Shearing postupak

Kako je već prije objašnjeno, nastajanje interferencijskih pruga uvjetovano je međusobnim djelovanjem dvaju koherentnih snopova svjetlosti koji izlaze iz dviju bliskih slika I_1 i I_2 istog izvora svjetlosti i određenog razmaka. Kod Shearing postupka dva koherentna vala dobiju se dijeljenjem valne fronte tj. uzimanjem jednog dijela valne fronte za jedan val, a drugog dijela za drugi val. Razdvajanje svjetlosnog snopa slijedi tek nakon refleksije od objekta tj. u području stvaranja slike.

Nakon toga se referentni val poprečno pomakne pomoću optičkog klina u područje stvaranja slike, koja u potpunosti sadrži strukturu objekta. Na taj način od objekta nastaje dvostruka slika. Primijenjen postupak poznat je pod nazivom Shearingov princip razdvajanja slike. Na (slici 2.2.3.a) prikazana je brazda kako se vidi kroz okular prije razdvajanja slike, a na (slici 2.2.3.b) dat je prikaz dvostruke poprečno pomaknute slike brazde nakon razdvajanja Shearing postupkom.



Slika 2.2.3. Prikaz dvostruko poprečno zamaknute slike brazde nakon razdvajanja Shearingovom metodom

Okolinu objekta u ovom slučaju čini gornja pozlaćena površina etalona na kojoj su vidljive pruge interferencije, a objekt čine djelomične slike pozlaćene brazde na kojima su pruge interferencije pomaknute u suprotnim smjerovima za jednake iznose s obzirom na interferencijske pruge u okolini i to ovisno o dubini brazde.

Razlika optičkih putova Δ , pomoću koje se može dobiti dubina brazde, može se tom metodom odrediti na dva načina:

- metodom s prugama
- metodom komparacije u homogenom polju

Po metodi s prugama razlika se optičkih putova može odrediti direktno na slici mjerenjem odklona pruge A na djelomičnoj slici objekta brazde i razmaka pruga B , te računanjem prema izrazu:

$$\Delta = \frac{A}{B} \cdot \lambda_s \quad (2.22.)$$

λ_s – valna duljina korištene svjetlosti

Osim direktnog mjerenja u metodi s prugama, može se ono izvršiti i pomoću mjernog kompenzatora postavljanjem nitnog križa na odgovarajuće interferencijske pruge na objektu i okolini. Iz toga proizlazi razlika optičkih putova:

$$\Delta = (c_1 - c_2) \cdot Q \quad (2.23.)$$

gdje su: Δ - razlika optičkih putova

c_1 i c_2 – očitavanja na skali mjernog kompenzatora

Q – faktor skale

Faktor skale Q određuje se pomicanjem nitnog križa između dviju pruga (ili više pruga) određene valne duljine u okolini objekta i očitanjem razlike hoda mjernog kompenzatora:

$$Q = \frac{\lambda}{\text{ocitana razlika hoda mjernog kompenzatora}} \quad (2.24.)$$

Metoda komparacije u homogenom polju je pouzdanija, jer se mjeri dvostruka razlika hoda. Mjeri se tako da se jedna slika objekta postavi na određenu boju bijele svjetlosti ili najtamniju svjetlinu u monokromatskoj svjetlosti po cijeloj površini (pruge interferencije postavljene paralelno s ispitivanom površinom). Pomoću mjernog kompenzatora postavi se preko slike okoline druga slika objekta na istu boju bijele svjetlosti ili najtamniju svjetlinu u monokromatskoj svjetlosti.

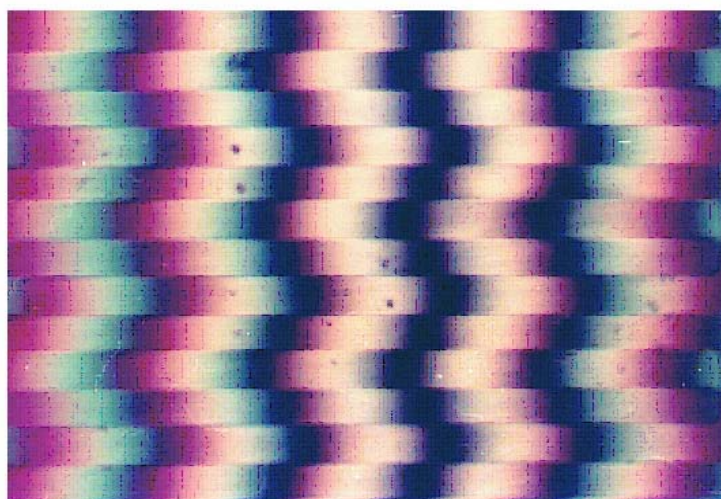
U tom slučaju dvostruka razlika optičkih putova iznosi:

$$2\Delta = (c_1 - c_3) \cdot Q \quad (2.25.)$$

c_1 i c_3 – očitavanja na skali mjernog kompenzatora

Pri radu objema metodama s monokromatskim izvorom svjetlosti mora se odrediti red interferencije ako nije sigurno poznato da mjerljiva razlika hoda nije manja od $\lambda s/2$.

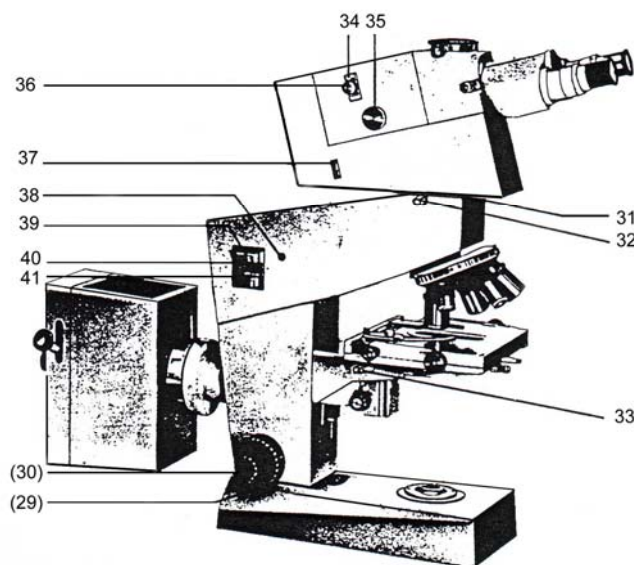
U monokromatskoj svjetlosti to je moguće samo ako se mogu pratiti pruge s objekta na okolinu. Općenito red interferencije određuje se na osnovi interferencijskih boja s bijelom svjetlosti. Za to je najpouzdanija bezbojna interferencijska pruga nultog reda na koju se simetrično u suprotnim smjerovima priključuju interferencijske pruge raznih boja. Bezbojne pruge se markiraju na okolini i objektu i zbroji se koliko cijelih pruga ima između bezbojnih pruga. Njihov zbroj upravo odgovara redu interferencije. Primjer pruga interferencije prikazan je (slikom 2.2.4.).



Slika 2.2.4. Pruge interferencije

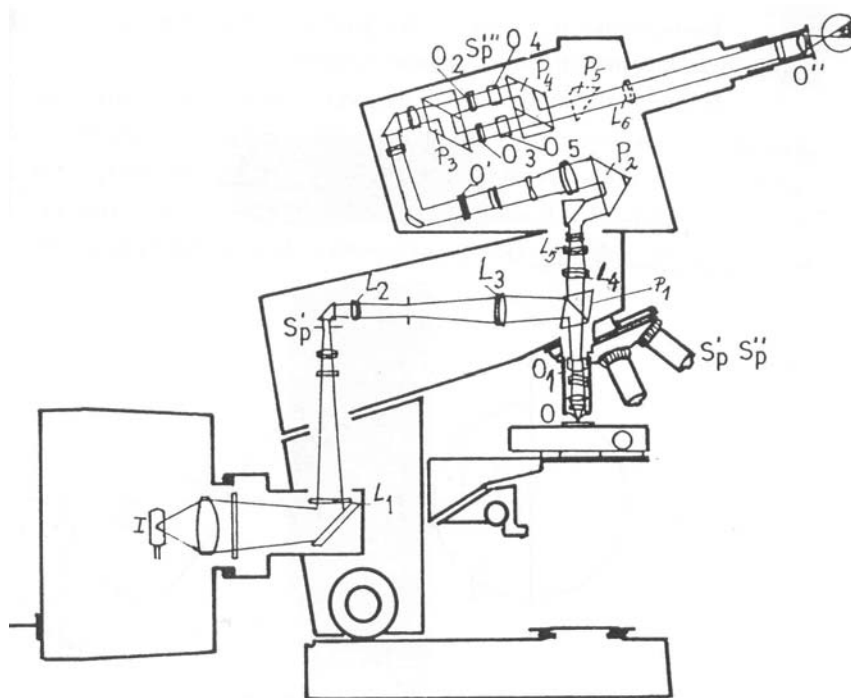
Epival - Interphako

Mjerenje dubine brazde d vršeno je interferencijskom metodom pomoću mikroskopa Epival - Interphako (slika 2.2.5.) proizvođača C. Zeiss Jena. Dobivene rezultate ćemo usporediti sa rezultatima debljine SiO_2 sloja koje smo dobili pomoću polarizacijske metode koristeći elipsometar AutoEL IV.



Slika 2.2.5. Interferencijski mikroskop Epival – Interphako

Navedeni je mikroskop prvenstveno namijenjen za interferencijska mjerenja dubina tehničkih površina kao i debljina tankih slojeva što je i primijenjeno u ovom slučaju kod mjerenja dubine brazde, njegove karakteristike omogućuju mu primjenu kao klasični mikroskop u druge mjerne svrhe (npr. mjerenje koraka i širine brazde, ispitivanje kvalitete tehničkih površina). Princip rada uređaja vidi se iz optičke sheme na (slici 2.2.6.) uz kratak opis radi kvalitetnijeg razumijevanja istog.

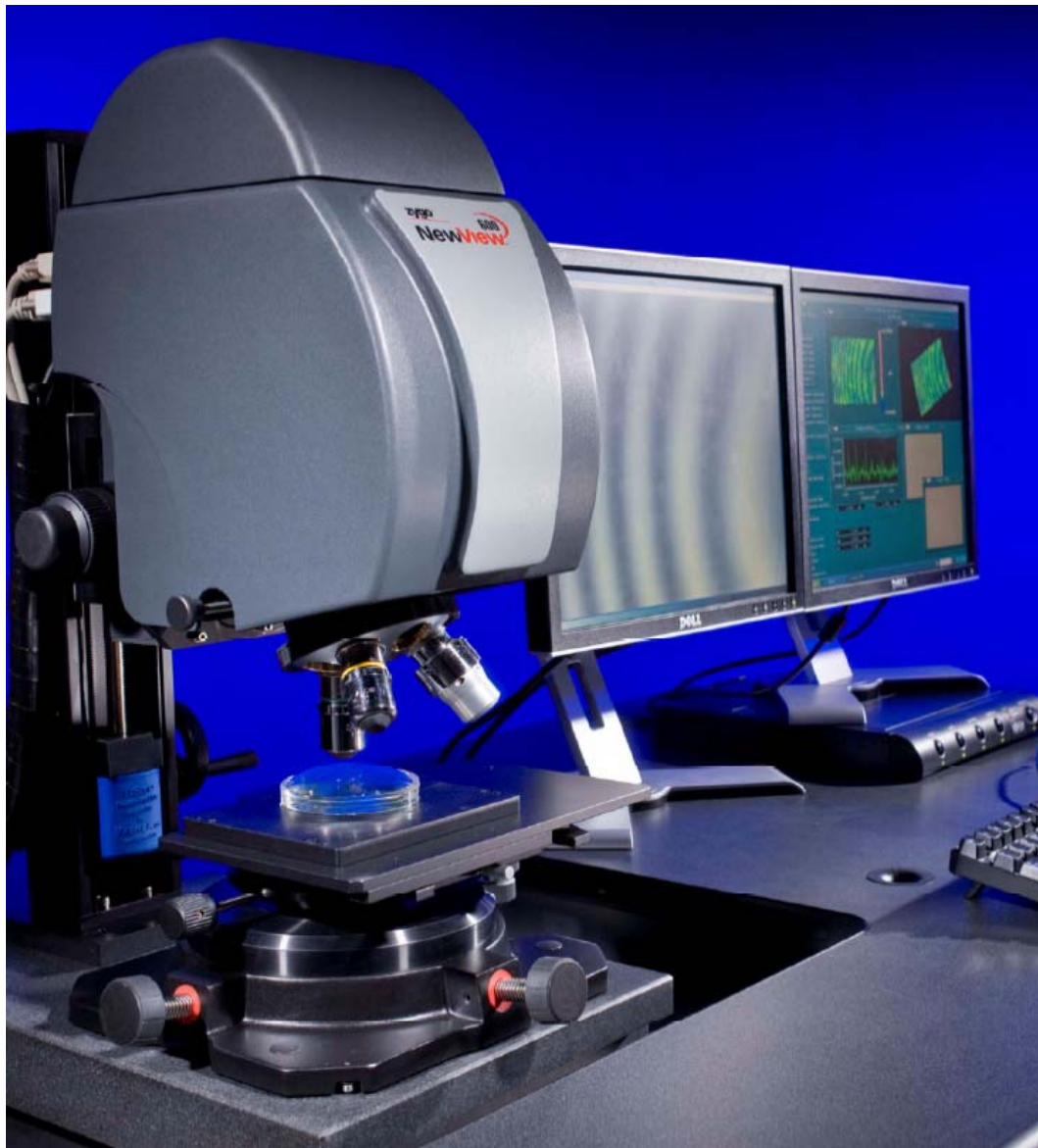


Slika 2.2.6. Optička shema mikroskopa Epival – Interphako

Izvorom svjetla (I) pomoću kolektora L_1 prosvjetljava se procjep S'_p . Važno je napomenuti da se umjesto procjepa može nalaziti rešetka ili prstenasti zaslon. Slika procjepa preslikava se pomoću leća L_2 i L_3 i diobene prizme P_1 u stražnju žarišnu ravninu objektiva O_1 . Objektiv preslikava sliku procjepa iz ravnine S'_p u beskonačnosti i nakon refleksije do objekta O opet se preslikava u svoju stražnju ravninu S''_p . Sistemom leća L_4 i L_5 slika procjepa S''_p preslikava se u ravninu S'''_p pomoću prizmi P_3 i P_4 sistema interferometra, okretnog optičkog klina O_2 ili prstenastog zaslona. Sliku objekta će objektiv i navedene grupe leća na kraju preslikati prema O i tada u ravninu okulara O'' .

Da bi se žarišna ravnina objektiva u svakom slučaju mogla preslikati u ravninu S''_p , ugrađena je pomična prizma P_2 . Tanki stakleni klin O_4 djeluje kao fazni pomak, a ploče izjednačenja O_3 i O_5 služe za namještanje homogenog interferencijskog polja ili pruge u polju. Pri uključanju Bertrandove leće L_6 može se promatrati pupila, a pri uključivanju prizme P_5 svjetlost se skreće prema fotoaparatu.

2.2.2. Zygo New View 600



Slika 2.2.7. Zygo“New View 600“

Tablica 4. Tehničke karakteristike sistema NewView 600

Proizvođač	Zygo; Middlefield, CT
Tehnike mjerenja	Bez kontakta, 3D, skeniranje bijelim svjetlom interferometrije
Skener	Zatvorena leća piezo baze, sa senzorima visokog linearnog kapaciteta
Vidno polje	0.05 – 3.5 mm, ovisno o objektivu
Osvjetljenje	Ugrađena bijela LED svjetla sa kompjutorski kontroliranom razinom osvjetljenja
Namještanje objektiva	Žlijeb za brzo umetanje objektiva
Kontrole	Optički filtar ladica, pomoćni fokus
Mjerno polje	640x480, ručno podesivo
Pogledi za gledanje	Standardni pogled uživo na zaslonu, moguć drugi LCD monitor
Faza finog fokusa	Srednja i precizna ručna kontrola, sa 30mm pomaka
Gruba Z - faza	Gruba, veliki izbor ručnog upravljanja, sa 250mm pomaka, stvarni pomak ovisi o konfiguraciji

Tablica 5. Tehničke karakteristike dodataka NewView 600

Objektiv	Beskonačno mjerenje interferencije objektiva; 2X, 2.5, 5X, 10X, 20X, 50X, 100X
Turrets	Ručna 6-pozicija zakreta Automatizirana 6-pozicija zakreta
Radni stol	864x1321x889mm
Standardi mjerenja	Standard bočne kalibracije Standard precizne bočne kalibracije SiC Reference Flat Step Height Standards

Tablica 6. Tehničke karakteristike osobina NewView 600

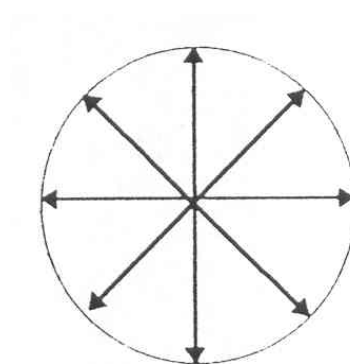
Domet vertikalnog skeniranja	$\leq 150\mu\text{m}$
Vertikalna res.	$< 0.1 \text{ nm}$
Bočna res.	$0.36 - 5.18 \mu\text{m}$
Brzina skeniranja podataka	$\leq 15 \mu\text{m/s}$
Max točka podatka	307.200
RMS sposobnost ponavljanja	$< 0.01 \text{ nm}$
Visina koraka	Točnost $\leq 0.75\%$ Ponovljivost $\leq 0.1\%$

2.3 POLARIZACIJSKA METODA MJERENJA DEBLJINE SiO₂ SLOJA

Svjetlo je definirano kao linearno polarizirani val, no međutim, svjetlo emitirano iz većine svjetlosnih izvora nije polarizirano. Zračenje prirodnih izvora svjetlosti nije nikada polarizirano u intervalima vremena u kojima se eksperimentira, pa je takvo zračenje nepolarizirano, prirodno ili obično. Svaki atom ili molekula emitiraju linearno polarizirani val u relativno kratkom vremenu (10^{-8} s) i pri tome jedan atom daje svjetlo polarizirano u jednom smjeru, a drugi u nekom drugom te se kaže da je takvo svjetlo nepolarizirano prirodno ili obično.

Polarizacija svjetlosti

Zračenje iz prirodnih izvora svjetlosti je nepolarizirano, prirodno ili obično. Na slici ispod prikazan je shematski način prikazivanja nepolariziranog vala svjetlosti.



Slika 2.2.3.1. Shematski način prikazivanja nepolariziranog vala svjetlosti

Kod nepolarizirane svjetlosti titranje je okomito na smjer širenja vala, ali u svim ravninama jednako. Postoji više načina da se od nepolarizirane svjetlosti dobije polarizirana svjetlost. Svjetlost može biti linearno, kružno, eliptično, ortogonalno, djelomično polarizirana ili mješavina različitih polarizacijskih stanja. Linearno polarizirani val svjetlosti može se prikazati u realnom obliku prema izrazu:

$$\vec{E}(z,t) = \vec{E} \cos(\omega t - k_1 z) \quad (3.1.)$$

Takav val može nastati sastavljanjem dvaju linearno polariziranih ortogonalnih valova konstantne i određene razlike faza δ .

$$\begin{aligned} E_x(z,t) &= \hat{x} E_{ox} \cos(\omega t - k_1 z) \\ E_y(z,t) &= \hat{y} E_{oy} \cos(\omega t - k_1 z + \delta) \end{aligned} \quad (3.2.)$$

gdje su \hat{x} , \hat{y} , \hat{z} jedinični vektori pozitivnog koordinatnog sustava.

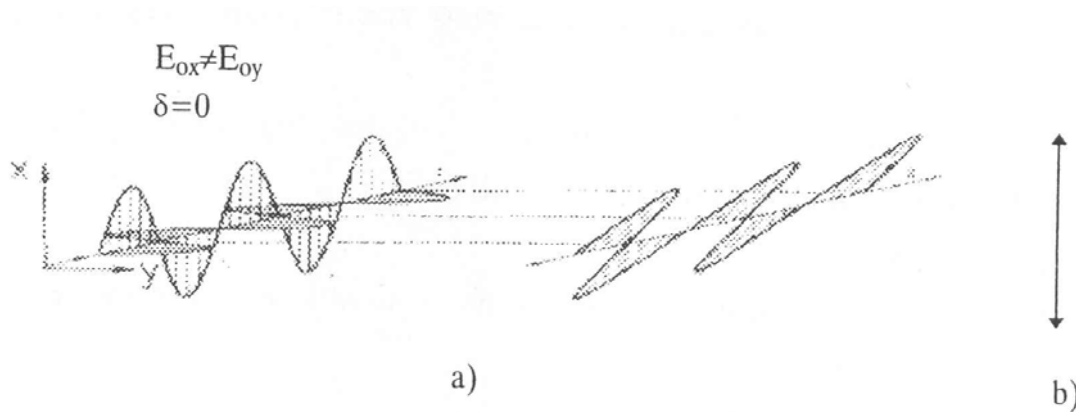
Da bi rezultatni val

$$\vec{E}(z,t) = \vec{E}_x(z,t) + \vec{E}_y(z,t) \quad (3.3.)$$

bio linearno polariziran mora biti razlika faza

$$\delta = \pm m \pi \quad m = \pm 0, 1, 2, 3 \dots \quad (3.4.)$$

Na (slici 2.3.2.a) prikazane su ortogonalne komponente rezultatnog vala, a na (slici 2.3.2.b) uobičajeni način prikazivanja linearno polariziranog vala.



Slika 2.2.3.2. a) Ortogonalni međusobno koherentni linearno polarizirani valovi i rezultatni linearno polarizirani val zakrenute ravnine vibracije

b) Uobičajeni način prikazivanja linearno polariziranog vala

Kružno (cirkularno) polarizirani val svjetlosti nastaje ako su amplitude komponentata valova E_{ox} ; E_{oy} jednake $E_{ox} = E_{oy}$ te ako su razlike faza

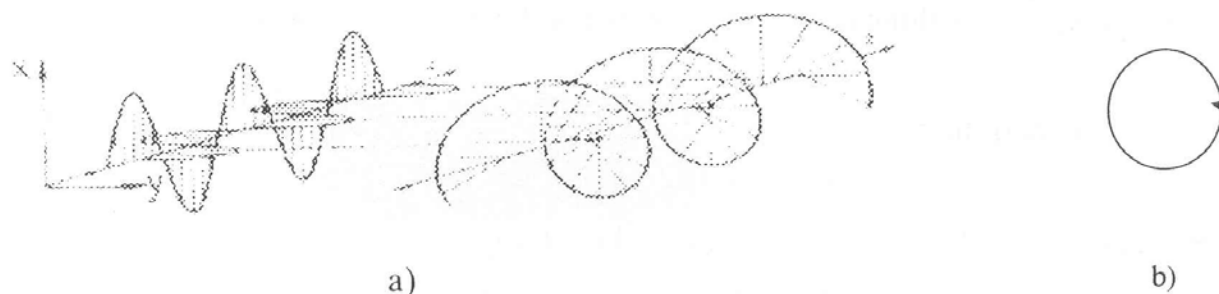
$$\delta_1 = -\frac{\pi}{2} + 2m\pi \quad m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (3.5.)$$

ili

$$\delta_2 = -\frac{\pi}{2} - 2m\pi \quad m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (3.6.)$$

Razlika faza prema izrazu (3.5.) daje lijevo kružno polarizirani val, a razlika faza prema izrazu (3.6.) desno kružno polarizirani val. Prema konvenciji u optici svjetlo je tada lijevo odnosno desno kružno polarizirano.

Na (slici 2.3.3.a) prikazane su komponente i rezultatni val desno kružno polariziranog svjetla. a na (slici 2.3.3.b) prikazan je uobičajeni način prikazivanja kružno polariziranog svjetla.



Slika 22.3.3. a) Ortogonalni linearno polarizirani valovi jednakih amplituda pomaknuti u fazi za $\lambda/4$ i rezultatni kružno polarizirani val

b) Uobičajeni način prikazivanja kružno polariziranog vala

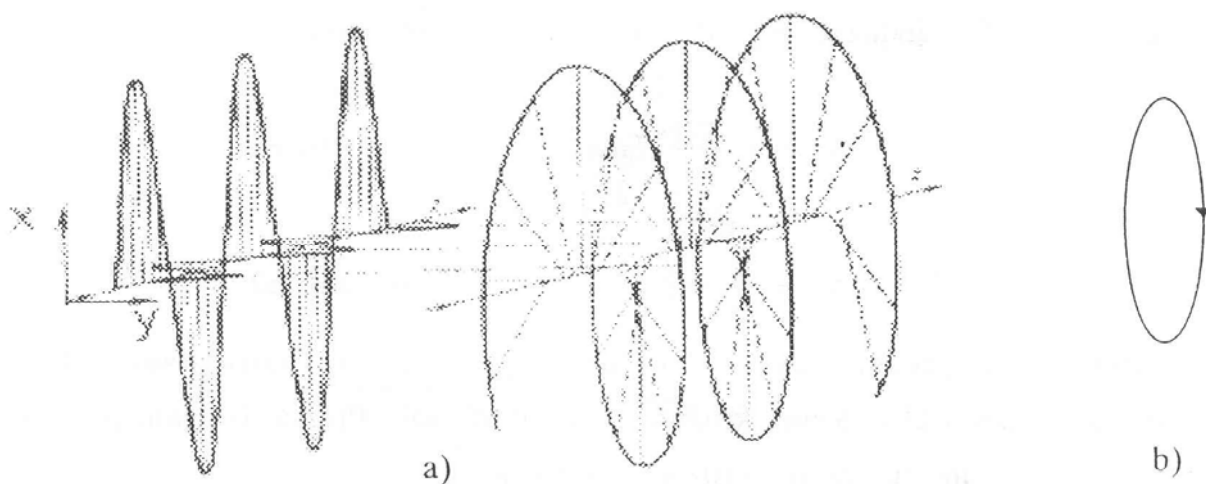
Eliptički polariziran val svjetlosti je najopćenitiji oblik polarizacije. Sastavljanje ortogonalnih linearno polariziranih valova rezultira u najopćenitijem obliku eliptičkom polarizacijom.

Na (slici 2.3.4.a) prikazane su komponente i rezultatni val desno eliptički polariziranog svjetla uz uvjete

$$E_{ox} \neq E_{oy}$$

$$\delta_1 = \frac{\pi}{2} - 2m\pi \quad m=0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (3.7.)$$

a na (slici 2.3.4.b) prikazan je uobičajeni način prikazivanja eliptički polariziranog svjetla.



Slika 2.2.3.4. a) Ortogonalni linearno polarizirani valovi različitih amplituda, pomaknuti u fazi i rezultatni eliptično polarizirani val

b) Uobičajeni način prikazivanja eliptično polariziranog vala

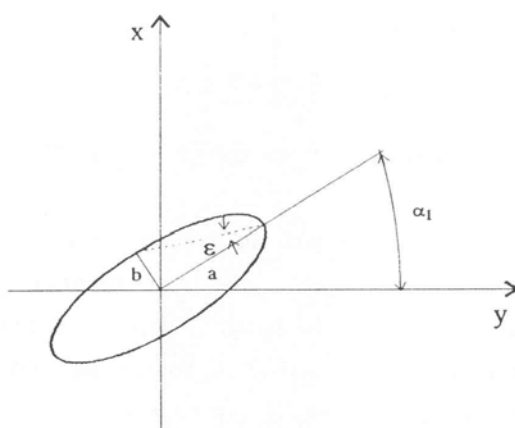
Eliptično polarizirano stanje definirano je sa dva parametra:

- orijentacija ili azimut α_1 velike osi elipse
- eliptičnost ε ,
- i prikazana je na (slici 2.3.5.) gdje je

$$\varepsilon = \arctan b/a$$

$2a$ – velika os elipse

$2b$ – mala os elipse.



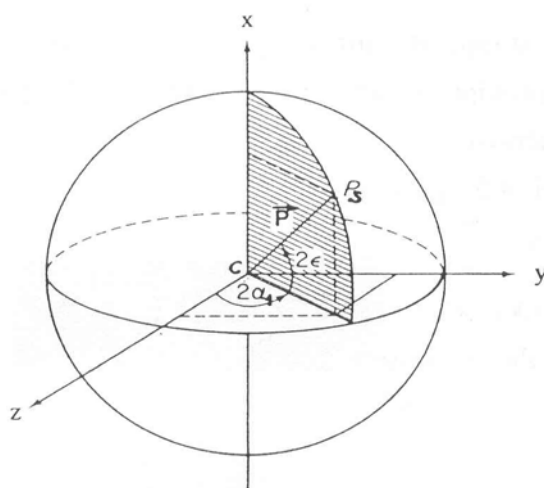
Slika 2.3.5. Projekcija eliptično polariziranog vala svjetlosti

U slučaju kada je eliptičnost mala elipsa je izdužena. U graničnom slučaju kada je $\varepsilon = 0$ eliptično polarizirano svjetlo prelazi u linearno polarizirano. Kada je $\varepsilon = 1$ svjetlo je kružno polarizirano.

Za dva snopa polarizirane svjetlosti kaže se da su ortogonalna ako je:

- svjetlo linearno polarizirano u međusobno okomitim ravninama,
- jedan val je desno kružno polariziran, a drugi lijevo kružno polariziran,
- valovi su eliptično polarizirani a azimutima velikih osi razmaknutima za 90° , iste eliptičnosti.

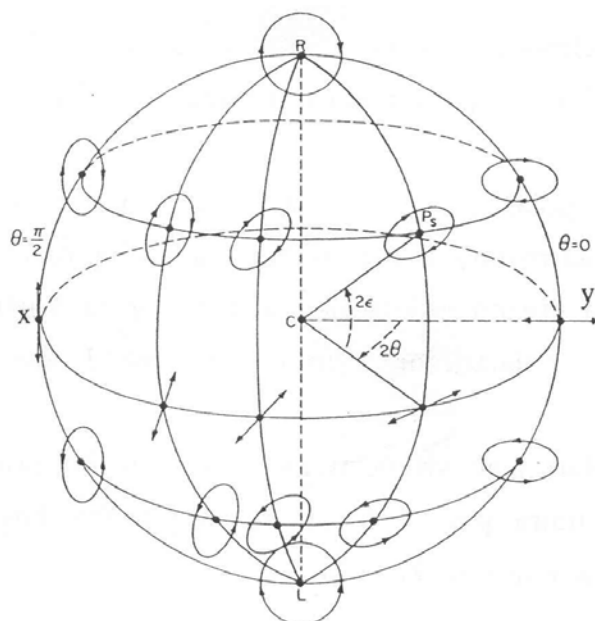
Sva stanja polarizacije svjetlosti mogu se zajedno prikazati točkom P_s , ili točnije vektorom \vec{P}_s koji definira položaj točke P_s na površini kugle jediničnog promjera koja se naziva Poincaréova kugla (slika 2.3.6.).



Slika 2.2.3.6. Poincaréova kugla

Smjer i iznos vektora \vec{P}_s određeni su vrijednostima 2ε i $2\alpha_1$. Točka P_s linearno polarizirane svjetlosti leži na ekvatoru, gdje y-z ravnina presijeca kuglu. Eliptično polarizirano svjetlo nalazi se na kugli iznad i ispod ekvatora. Eliptično polarizirano svjetlo sa istim azimutom α_1 određeno je točkama na datom meridijanu. Elipse sa istom eliptičnošću ε leže na kružnici datog polumjera.

Kružna polarizacija odgovara polovima Poincaréove kugle. Ortogonalna polarizacija prikazana je točkama gdje je kut $\theta = 0$ i $\theta = 90^\circ$. (slika 2.3.7.).

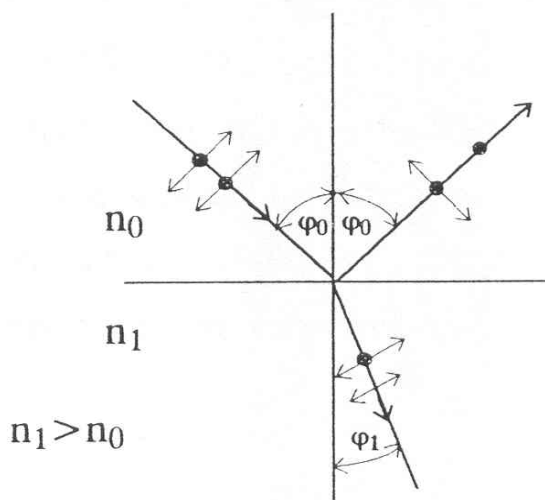


Slika 2.2.3.7. Stanja polarizacije prikazana na Poincaréovoj kugli

Dobivanje linearno polariziranog svjetla

Svjetlo se može polarizirati refleksijom prirodne (nepolarizirane) svjetlosti na granici dvaju dioptrijskih sredstava, transmisijom kroz dioptrijsku plohu, te prolazom svjetlosti kroz anizotropna sredstva.

Kada nepolarizirana prirodna svjetlost pada na staklenu površinu jače se reflektiraju valovi čiji električni vektor titra okomito na upadnu ravninu. Zbog tog su reflektirana i transmitirana zraka djelomično polarizirane. (slika 2.3.8.).

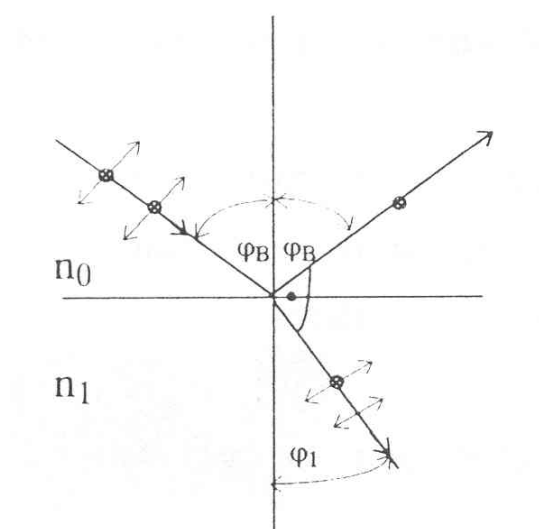


Slika 2.2.3.8. Djelomično polarizirano svjetlo

Stupanj polarizacije ovisit će o kutu upada φ_0 . Postoji kut kada se reflektiraju samo valovi čiji električni vektor titra okomito na upadnu ravninu. To je tzv. Brewsterov kut, koji se može odrediti iz relacije

$$\varphi_B + \varphi_1 = 90^\circ \text{ ili } \varphi_B = n_1 \text{ za } n_1 = 1 \quad (3.8.)$$

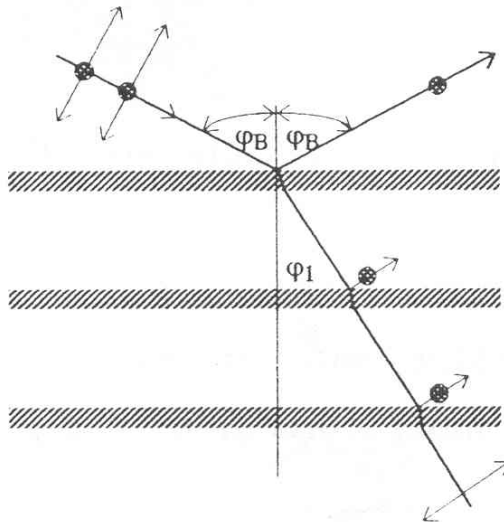
Znači da je sva svjetlost koja je reflektirana, linearno polarizirana sa električnim vektorom okomitim na upadnu ravninu (slika 2.3.9.).



Slika 2.2.3.9. Polarizacija refleksijom

Ako, dakle, snop prirodne svjetlosti padne pod Brewsterovim (polarizacijskim) kutom, transmitirana svjetlost je djelomično polarizirana (slika 2.3.9.).

Kada pak prirodni snop svjetlosti pada pod polarizacijskim kutom na više staklenih ploča istog loma, umjesto na jednu površinu, uzastopnim odbijanjem može se infiltrirati sve više i više normalna komponenta. Na taj način može se dobiti skoro potpuno odbijanje svjetlosti u dva linearno polarizirana snopa (slika 2.3.10.).

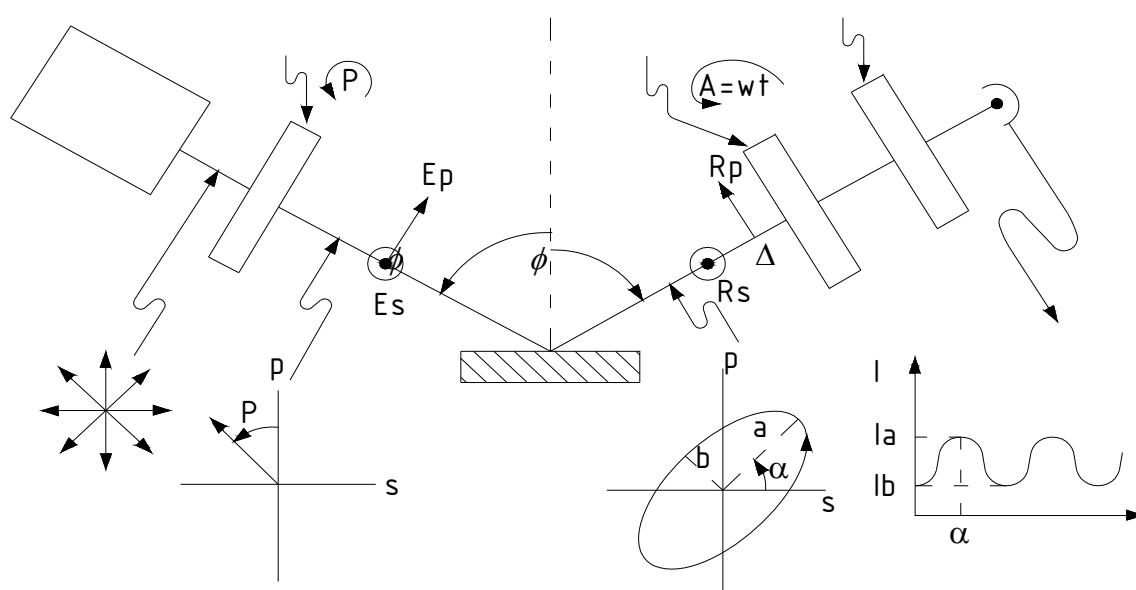


Slika 2.2.3.10. Polarizacija refleksijom i transmisijom

Propušteni snop, sastoji se skoro potpuno od valova u kojima je E-vektor paralelan upadnoj ravnini, dok reflektirani snop sadrži samo valove u kojima je E-vektor okomit na tu ravninu. Svaki uređaj koji propušta samo valove u kojima E-vektor ima samo jedan smjer naziva se polarizator, a njegovo će djelovanje biti objašnjeno naknadno u elipsometru AutoEL IV.

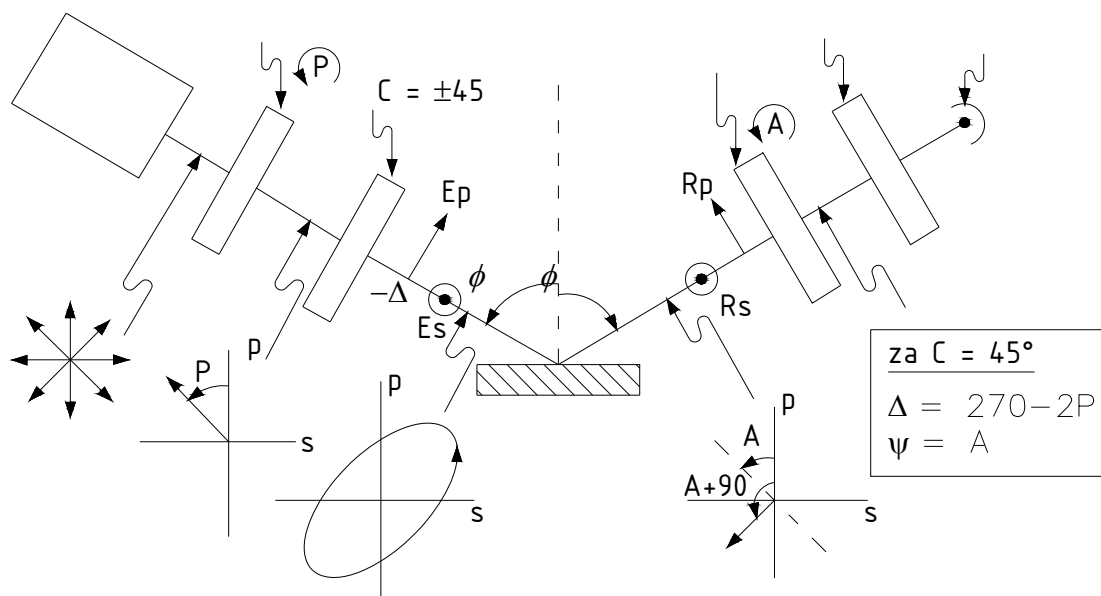
Tipovi elipsometara

Postoje dva osnovna tipa elipsometara. Prvi tip, kojeg je AutoEL primjer, je nulti tip elipsometra; njegova konfiguracija prikazana je na (slici 2.3.12.). Drugi tip je rotirajući element (fotometrički) tip, koji je obično umetnut sa rotirajućim analizatorom (kao u Rudolphovom modelu za istraživanje RR2436). Rotirajuća analizator konfiguracija prikazana je na (slici 2.3.11.).



Slika 2.2.3.11. Konfiguracija rotirajućeg analizatora (Fotometričkog)

Oba tipa elipsometra imaju dvije optičke osi, os ulaznog snopa i os reflektirajućeg snopa, koji su prilagodljivi poželjnim kutevima ulaska s poštivanjem prema uzorku koji se nalazi na presjeku osi. Izvor kolimatiziranog, monokromatskog ili kružno-polariziranog svjetla smješten je na kraju osi ulaska snopa, daleko od presjeka dviju osi.



Slika 2.2.3.12. PCSA Nulta konfiguracija

Kolimatiziran snop svjetla iz izvora prolazi kroz bilo koju optičku komponentu koje su montirane duž osi ulaska snopa, udari i reflektira se od površine uzorka, i prolazi kroz bilo koje optičke komponente koje su montirane duž osi reflektirajućeg snopa, dok ne uđe u foto detektor na kraju osi reflektirajućeg snopa.

2.3.1. Elipsometar AutoEL IV

AutoEL IV polarizator modul

Montirani uzduž AutoEL optičke osi polarizator modula su, s lijeva na desno:

A. Valjkasti modul s izvorom svjetlosti koji sadrži Volfram-halogenu žarulju visoke učinkovitosti (osim na IV-Hg, koji upotrebljava lampu sa živinim lukom) koji je u kombinaciji sa kolimatiziranom (oblik grede) optikom do paralelne grede "bijelog" svjetla približno dva milimetra u promjeru. Svjetlo odaslano Volfram-halogenom žaruljom je sastavljeno od kontinuiranih valnih duljina i jednako je izvoru crnog-tijela sa rasprostranjenjem Planck valne duljine. Na IV-Hg, izvor živinog luka odašilje snažne spektralne zrake na važnim valnim duljinama.

B. Nije potrebno nikakvo gušenje snopa iz izvora svjetlosti.

C. Svjetlost emitirana iz izvora svjetlosti nije polarizirana i nema potrebe polarizirati je kružno. Kružna polarizacija jednaka je ne polarizaciji utoliko kao kada je svjetlo prošlo kroz polariziranu prizmu, nikakva varijacija u intenzitetu rezultirajućeg linearno polariziranog snopa nije smanjena kada je prizma zarotirana.

D. Kalcitna Glan-Thompson polarizirana prizma. Osi prijenosa prizme mogu se zarotirati na željen azimut. Prizma je zarotirana koračnim motorom pod kontrolom pomoćnog mikroračunala. Nepolarizirano svjetlo iz izvora svjetla prolazi kroz kružnu polariziranu prizmu i nastaje linearno polarizirano svjetlo u azimut paraleli na prijenosnu os prizme. Tako, AutoEL kontrolira polarizaciju azimuta kolimatiziranog snopa koji izlazi iz prizme. Također, kako svjetlo koje ulazi u polariziranu prizmu nije polarizirano, jačina linearno-polariziranog snopa koji ulazi u prizmu je neovisna o azimutu prizme.

E. 4-pozicioniran slajd nadoknađivač. Ovaj precizan mehanički slajd pozicioniran je automatski linearno pored pokretača na komandama glavnog mikroračunala. Tri od četiri pozicije sadrže liskun četverovalnu ploču nadoknađivača, jednu za svaki od AutoEL IV operativnih valnih duljina. (Prazna četvrta pozicija dozvoljava snopu svjetlosti da prođe nesmetano i upotrijebljena je za pokretanje, poravnanje i dijagnostičke testove. Tijekom rada na AutoEL, jedan od tri nadoknađivača je izabran (da odgovara valnoj duljini na kojoj se uzorak mjeri) i linearni pobuđivač automatski pomakne mehanički slajd na točnu poziciju.

Svaki od tri nadoknađivača ima istu funkciju, da pretvori linearno polarizirani snop koji ulazi u polariziranu prizmu do eliptički polariziranog snopa. Eliptičnost snopa koji ulazi nadoknađivač direktna je funkcija polariziranog azimuta svjetla koje dolazi od polarizirane prizme. Dakle, eliptičnost snopa svjetlosti može se kontrolirati pomoćnim mikroračunalom preko koračnog motora koji rotira polariziranu prizmu.

F. Otvorena ploča, koja utvrđuje sa daljnjom preciznošću smjer i promjer snopa svjetlosti koji ulazi u polarizirani modul.

AutoEL IV analizator modul

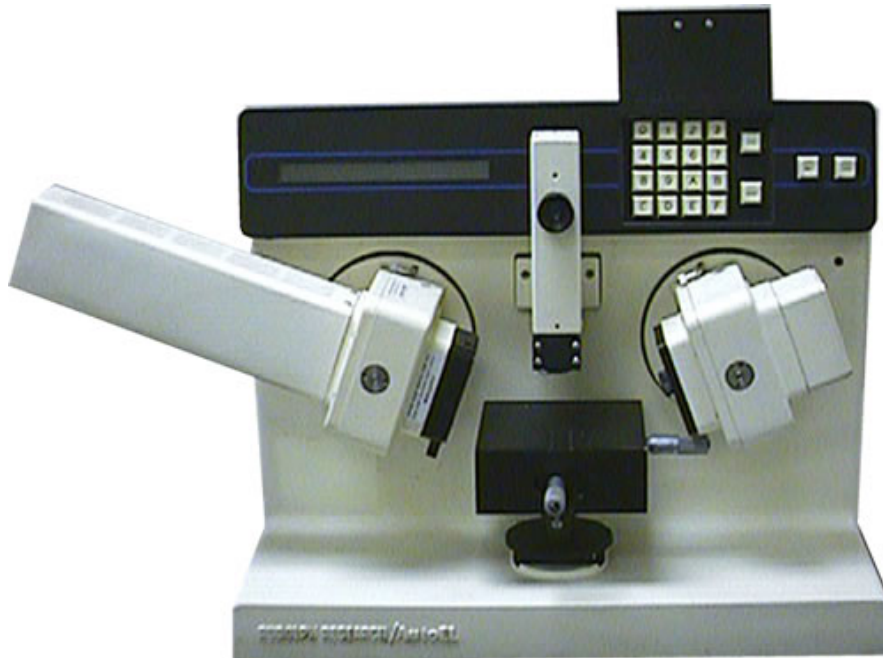
Montirani uzduž AutoEL IV analizator modula optičke osi su s lijeva na desno:

A. Otvoren otvor na stožastom kraju cilindričnog otvora modula, koji se našara na otvorenu ploču. Blizina otvora uzorku poboljšava svoju sposobnost da isključi svjetlo ambijenta koje bi moglo smetati mjerenju, ipak 4 mm oslobođenja između faze otvaranja i uzorka dovoljno je da omogući uzorku rukovanje i prijanjanje. Kao na AutoEL III, veličina otvora pažljivo je odabrana da omogući reflektirajućem snopu da prođe nesmetano, isključujući zalutalo svjetlo ambijenta što je više moguće.

B. Rotirajuća kalcit Glan- Thompson polarizirajuća prizma koju pokreće „motor koji dobro gazi“. Sastavljanje analizirajuće prizme (uključujući motor koji dobro gazi i vodeći hardver) je identična sastavljanju polarizirajuće prizme. Reflektirajući snop ima stanje polarizacije utvrđeno stanjem polarizacije ulaznog snopa (koji se može kontrolirati mijenjanjem azimuta polarizirane prizme) i fizičkim svojstvima uzorka na koja nailazi ulazni snop. Ovisno o ovim faktorima snop koji ulazi u prizmu može biti linearan, eliptičan ili kružno polariziran. Osim ako je polarizacija točno kružna (iznimke postoje) rotacija analizator prizme uzrokovat će promjene (minimalne i maksimalne) u opsegu snopa koji izlazi iz prizme. U AutoEL nevažećoj proceduri cilj je manipulirati stanje polarizacije snopa koji ulazi u prizmu tako da polarizacija reflektirajućeg snopa je jednaka linearnoj; kada je to postignuto snop može biti totalno ugašen analizator prizmom kada je prizma zarotirana tako da je polarizacijski azimut okomit na polarizaciju azimuta reflektirajućeg (linearno polarizirajućeg) snopa. Intenzitet snopa koji ulazi mjerenje detektorom strujnog kruga dozvoljavajući AutoEL da osjeti minimum i gašenje odaslanog snopa.

C. Tro- pozicijski filter slajd. Ovaj precizni mehanički slajd postavljen je automatski pored linearnog aktivatora na komandama glavnog mikroračunala. Tri pozicije sadrže usko povezane optičke međudjelovane filtere, jedan filter za svake od AutoEL IV radne valne duljine. Filteri su dizajnirani da spriječe ili priguše protok svjetla koji nije na poželjnoj valnoj duljini. Svaki filter u filter slajdu dizajniran je za istu valnu duljinu kao i odgovarajući kompenzator u kompenzator slajdu. Tijekom rada AutoEL, jedan od tri filtera je odabran (da odgovara valnoj duljini na kojoj će se mjeriti uzorak) i linearni aktivator automatski pomiče mehanički slajd na pravilnu poziciju.

D. Detektor fotomultiplikator cijevi (PMT). Detektor pretvara energiju snopa svjetlosti rušeći je u električni trenutak proporcionalan intenzitetu snopa svjetlosti. Veličina trenutka je skupljena analog - digitalnim pretvaranjem i rezultat, broj izražen u relativnim terminima intenziteta snopa svjetlosti, pohranjen je na pomoćno mikroračunalo. Detektor zatim dozvoljava AutoEL da osjeti intenzitet snopa svjetlosti koji izlazi iz optičkog sistema i ova informacija dozvoljava mu da rotira polarizator i analizator prizme pametno tijekom procesa mjerenja uzorka.



Slika 22.3.13. Elipsometar AutoEL IV

Karakteristike AutoEL IV

Elipsometar AutoEL IV sadrži glavno i pomoćno računalo koji pokreću precizne koračne motore. Oba modula, dakle polarizatorski te analizatorski modul pokreću se sa preciznošću 0.05° , korak kuta Δ iznosi 0.1° , a kuta ψ 0.05° . Za izvor svjetlosti koristi volframovu halogenu svjetlost sa tri različite radne valne duljine (633, 546, 405 nm). Maksimalna veličina uzorka za mjerenje je $6'' \times 6''$. Može se odabrati nekoliko vrsta mjerenja, a prema odabranoj opciji mijenja se promjer zrake te veličina mjerne površine. Isto tako elipsometar AutoEL IV osim ručnog načina rada, ima mogućnost odabira određenog programa za pojedine uzorke tako da se automatski odabiru točke mjerenja.

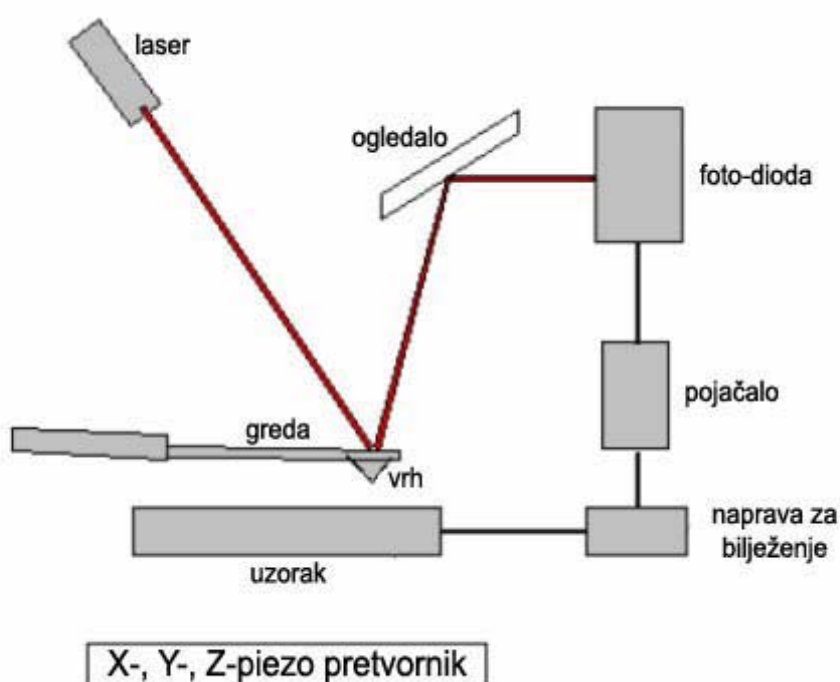
2.4. AFM (MIKROSKOP ATOMSKIH SILA)

(*Atomic force microscope*) Mikroskop atomskih sila je uređaj koji je prvenstveno namijenjen ispitivanju površina, ne nužno vodljivih. AFM mikroskop ima vrlo visoku rezoluciju i danas predstavlja jedan od najčešće korištenih alata za manipulaciju tvarima na nano-razini, odnosno premještanja atoma ili molekula po površini materijala.

AFM ne mjeri struju između vrha mikroskopa i uzorka, nego silu koja djeluje među njima. Sile koje su važne u ovom slučaju su jaka odbojna sila koja se pojavljuje na malim udaljenostima kao rezultat preklopa elektronskih gustoća vrha sonde mikroskopa i uzorka i dugodosežna *Van der Waals*-ova sila.

AFM se sastoji od fleksibilnog ticala s vrlo oštrim vrhom na njegovom slobodnom kraju koje se koristi za skeniranje površine uzorka. Ticalo je obično silicij ili silicijev-nitrit s vrhom radijusa nanometarskih veličina.

Na (slici 2.4.1.) bit će objašnjen princip rada mikroskopa atomskih sila.

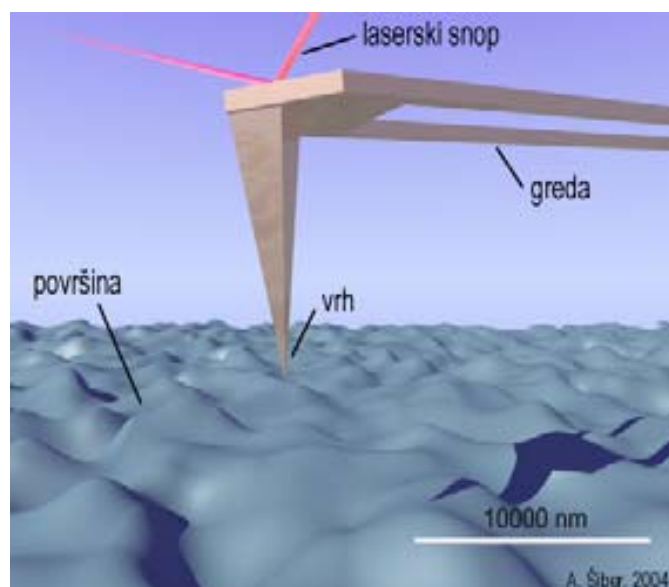


Slika 2.4.1. AFM

Oštri vrh AFM sonde mikroskopa postavljen je okomito na ticalo "mikroskopskih" dimenzija. Mali pomaci ticala mjere se ili optički (koristeći laser – interferometrija) ili električki (piezoelektrične metode kada je greda napravljena od piezoelektrika, primjerice kvarca). Pomak ticala proporcionalan je sili koja djeluje između vrha i uzorka. Promjene mjerene sile, kako se vrh pomiče po površini, snimaju se i ovakva se informacija koristi za rekonstrukciju slike površine. AFM funkcionira i izvan visokovakuumskih uvjeta i može se upotrijebiti za promatranje bioloških uzoraka.

Kod mikroskopa atomskih sila postoje dva načina mjerenja:

- Kontaktni – AFM vrh je u laganom (mekanom) fizičkom dodiru s uzorkom. Kako se vrh približava površini uzorka, međuatomske sile postaju sve jače i odbijanje je sve veće, a s obzirom da ticalo ima malu konstantu opruge, sile će uzrokovati savijanje ticala i praćenje površine uzorka. Prema tome, detekcija položaja ticala stvara topografiju površine uzorka.
- Bezkontaktni – ticalo vibrira blizu površine uzorka. Razmak između vrha i uzorka je reda veličine desetinki nanometra. Beskontaktni AFM režim rada osigurava mjerenje topografije uzorka bez kontakta (ili s vrlo malo kontakta) između vrha i uzorka što predstavlja prednost pri proučavanju elastičnih uzoraka kao što su bio-molekule.



Slika 2.4.2. Prikaz mjerenja AFM-om

2.4.1. Termo Mikroskop „Autoprobe CP“



Slika 2.4.3. Termo Mikroskop „Autoprobe CP“

Tablica 7. Osnovne osobine Autoprobe CP

Proizvođač	Thermo Microscopes, Autoprobe CP
Glava sonde	Radi u C-AFM, NC-AFM, LFM i STM modovima
Skener	Veliko područje (~90 μ m), piezoelektrični skener
Domet skenera	Max bočna rezolucija skeniranja (~90 μ m) Max vertikalna rezolucija skeniranja (~90 μ m)
Kontrola rezolucije	Max DAC bočne rezolucije: 0.0013A Max DAC vertikalne rezolucije: 0.025A
Domet prijenosa mikroskopa	8mmx8mm
Veličina uzoraka	50mmx50mmx20mm
Pristup tipu uzorka	Automatski s tri neovisna koračna motora
Optički mikroskop	Opcijski mikroskop po osi sa video monitorom u boji za vrh sonde i pregled uzoraka

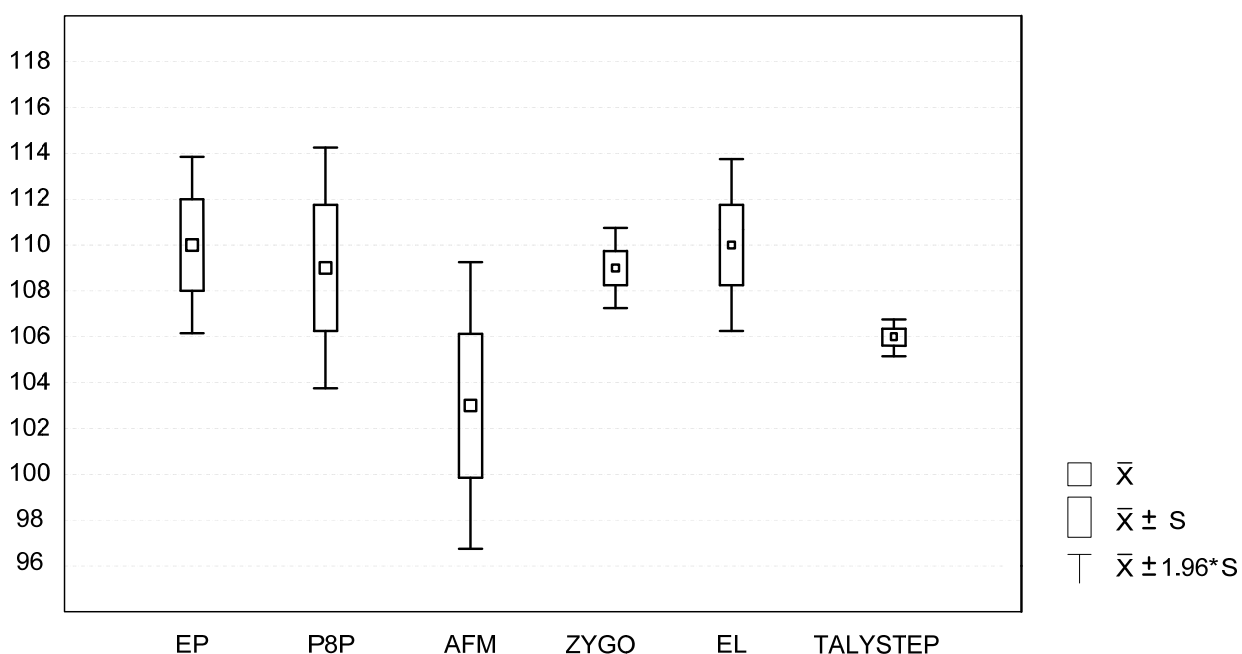
2.4.2. Taylor Hobson „Talystep1“



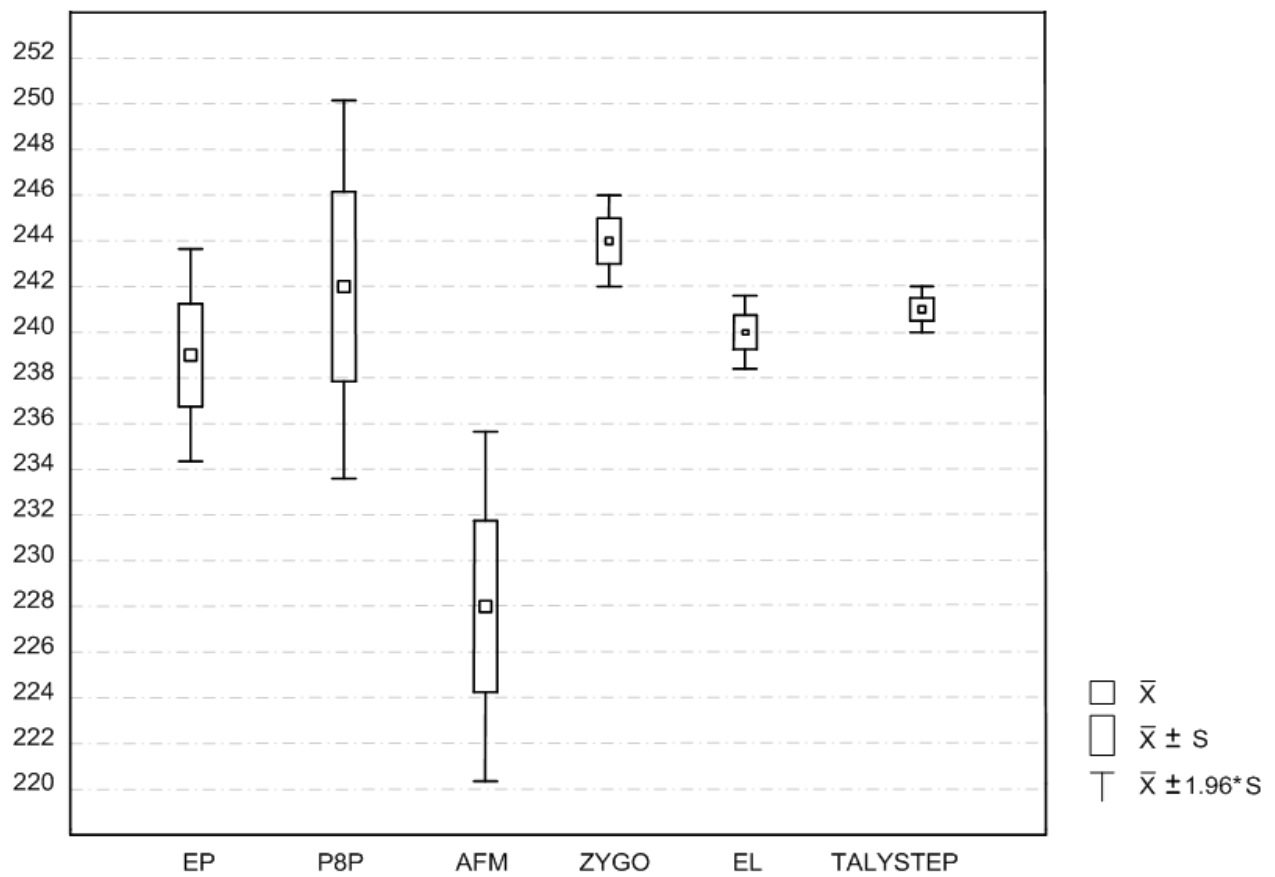
Slika 2.4.4. Taylor Hobson „Talystep1“

3. MJERENJA DUBINE BRAZDI NA ETALONIMA HRAPAVOSTI LFSB-a

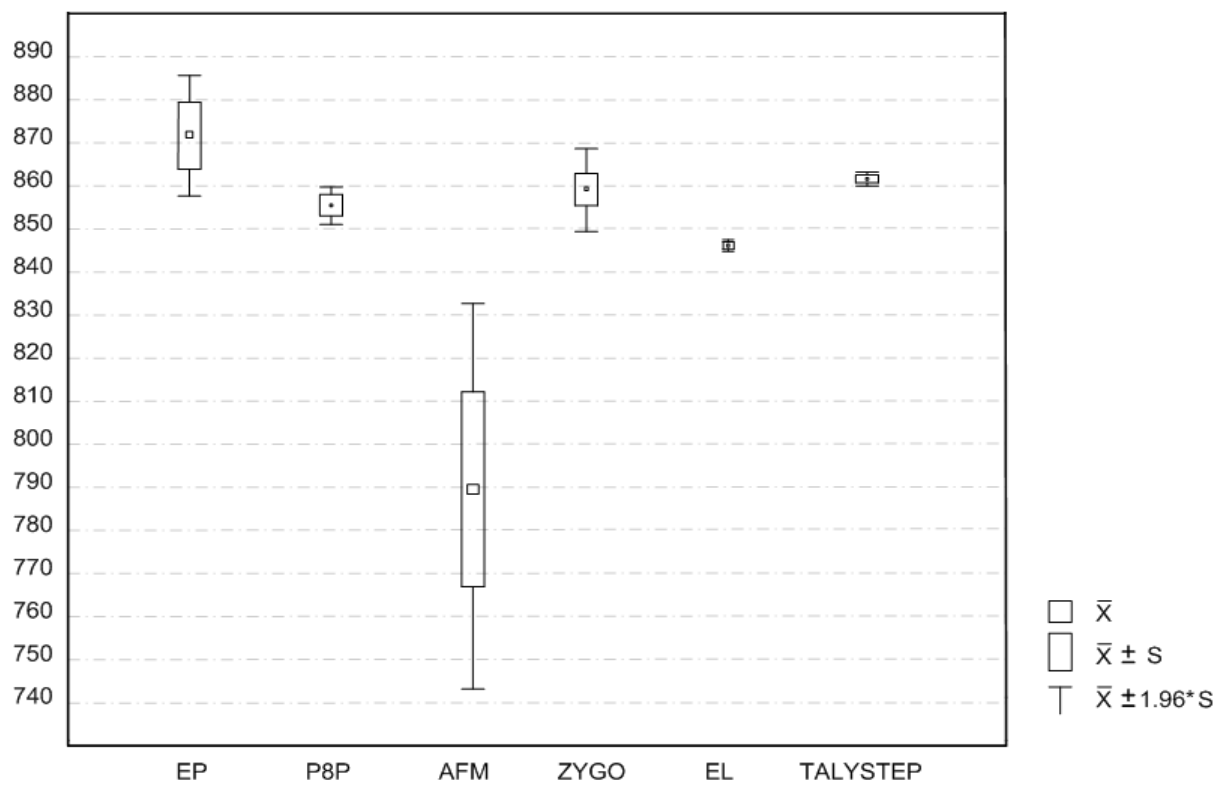
U ovom poglavlju ćemo dati rezultate mjerenja dubine brazdi na etalonima hrapavosti LFSB-a. Na sljedećim slikama ćemo vidjeti stvarne rezultate mjerenja dubine brazdi na sedam stalona hrapavosti. Dubine brazdi smo mjerili ovim uređajima: Epivalom (EP), Phertometrom (PH), Mikroskopom atomskih sila (AFM), Interferometrom „NewWiew200“ (ZYGO), Elipsometrom (EL) i na kraju Talystepom (TALYSTEP). Na svakoj slici ćemo vidjeti dvije osi. Na vertikalnoj osi su nanesene vrijednosti u nanometrima [nm], a ispod horizontalne osi sam stavio kratice za uređaje kojima smo mjerili dubine brazdi na sedam etalona hrapavosti.



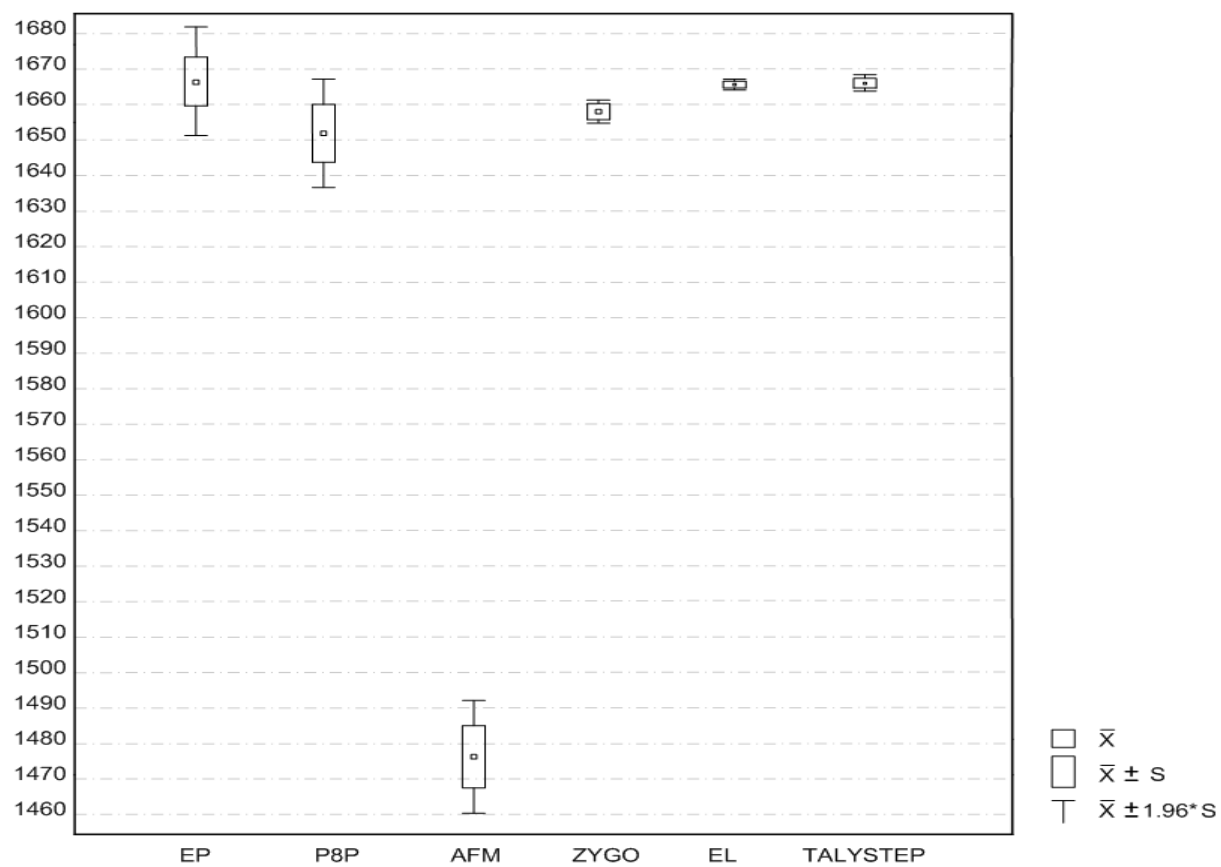
Slika 3.1. Rezultati mjerenja dubine brazde etalona 6-2G



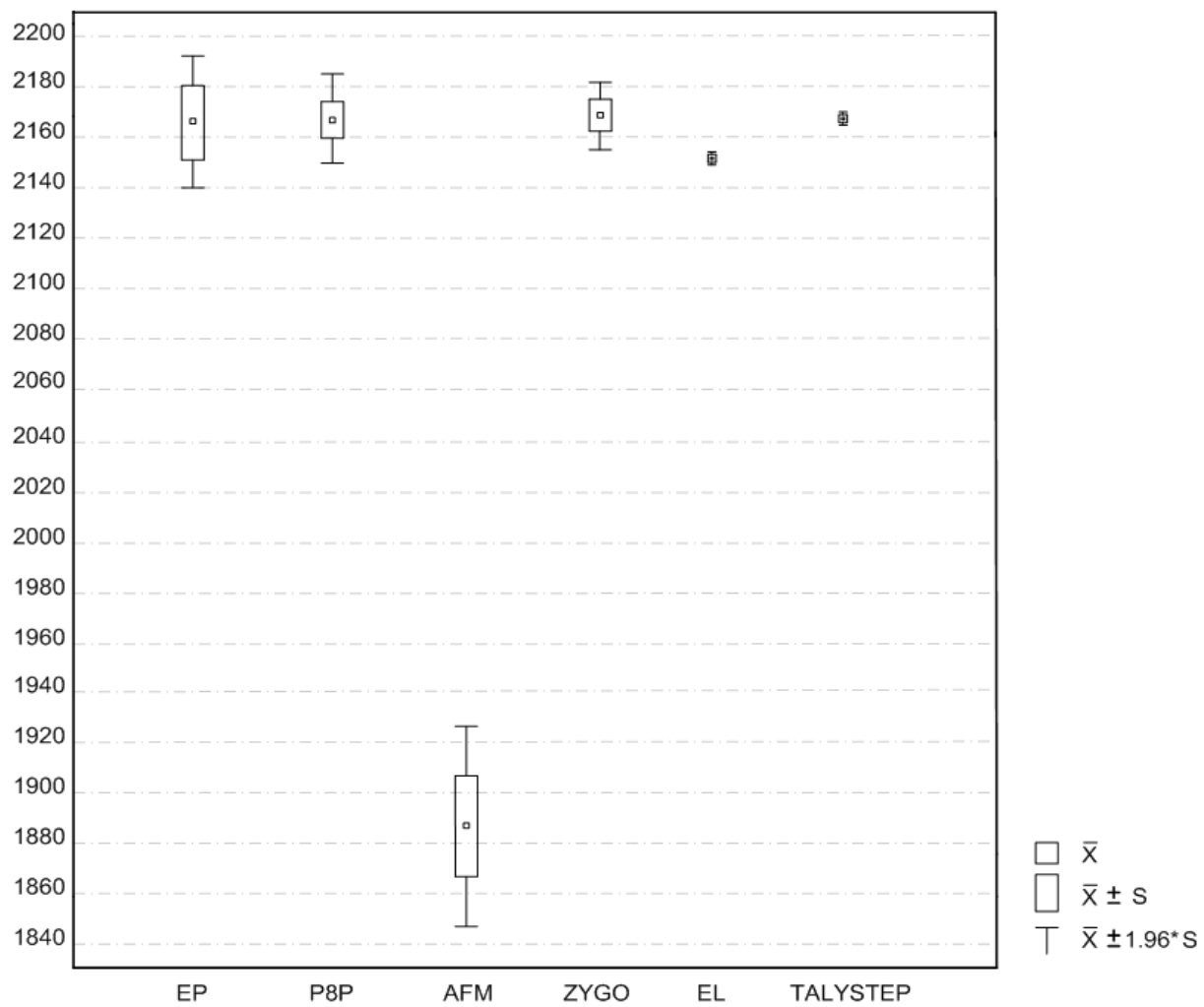
Slika 3.2. Rezultati mjerenja dubine brazde etalona 4-H



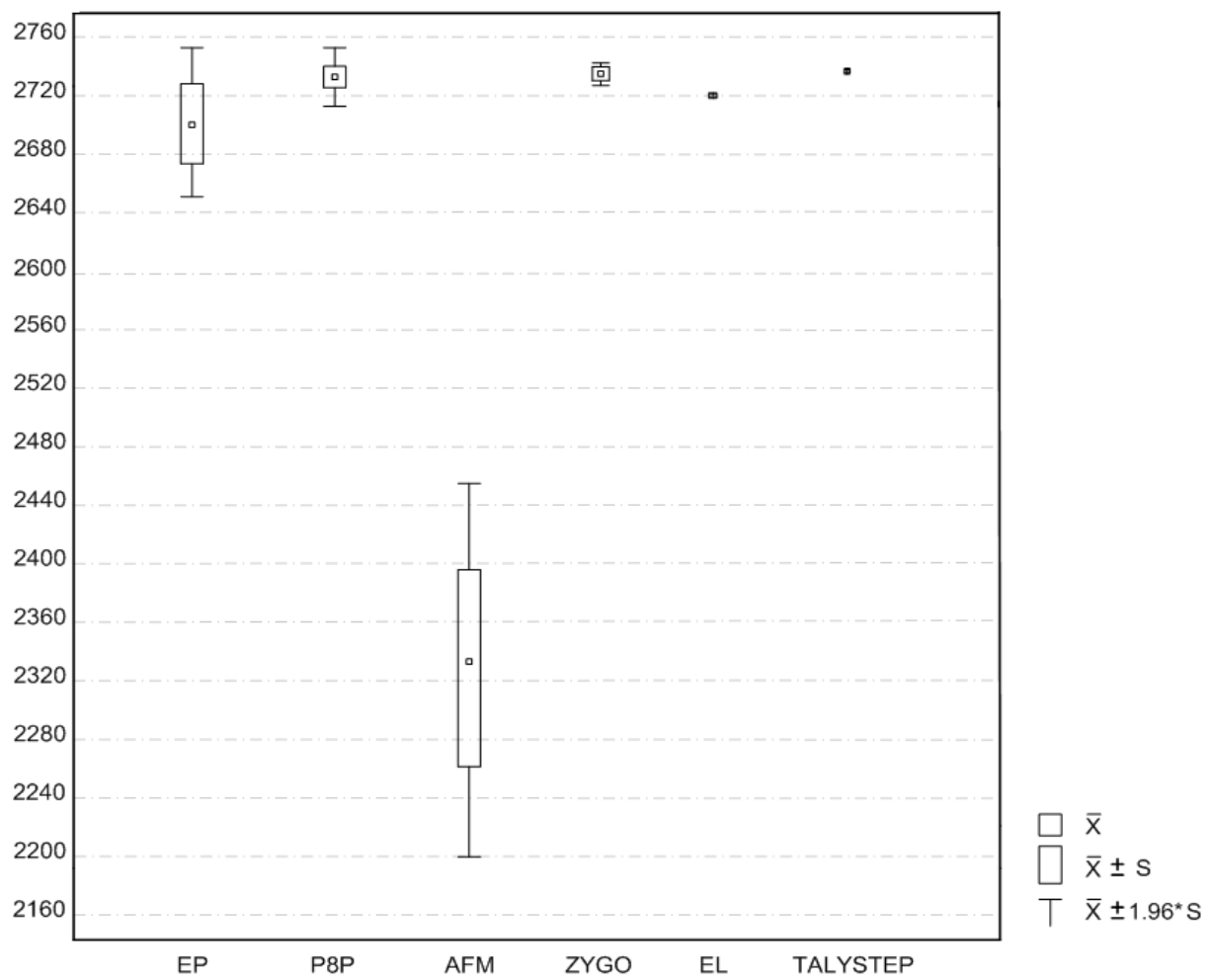
Slika 3.3. Rezultati mjerenja dubine brazde etalona YR06507



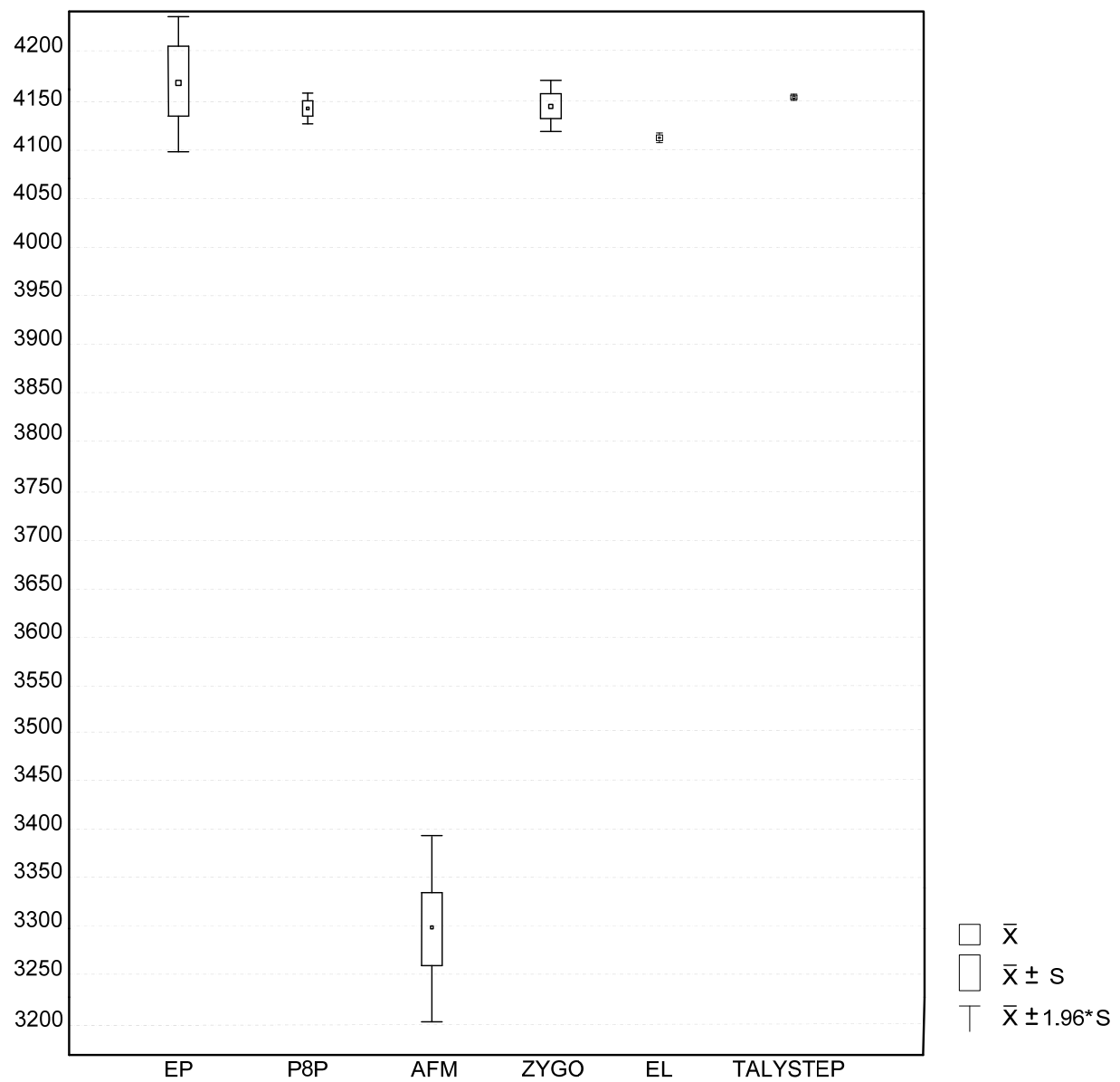
Slika 3.4. Rezultati mjerenja dubine brazde etalona 6-2M



Slika 3.5. Rezultati mjerenja dubine brazde etalona 3-2M



Slika 3.6. Rezultati mjerenja dubine brazde etalona 1x17402



Slika 3.7. Rezultati mjerenja dubine brazde etalona 3-2K

4. OBNOVLJIVOST REZULTATA MJERENJA

Na temelju donesenih rezultata mjerenja provest ćemo postupak procjenjivanja mjerne ponovljivosti i obnovljivosti za svaki etalon hrapavosti. Sukladno zahtjevima norme ISO 5725 prvo ćemo dati definicije, osnovne pojmove a tek onda ćemo ići na utvrđivanje da li su rezultati mjerenja ponovljivi ili obnovljivi preko određenih formula.

Mjerna ponovljivost je bliskost slaganja međusobno neovisnih rezultata mjerenja iste veličine dobivenih u uvjetima ponovljivosti rezultata.

Uvjeti ponovljivosti su uvjeti kod kojih su rezultati dobiveni uz:

- iste mjerne metode,
- istog mjeritelja,
- isti mjerni uređaj i opremu,
- isto mjesto,
- isti mjerni objekt,
- iste okolišne uvijete,
- nepromjenjivost objekta mjerenja u toku ispitivanja.

Mjerna vrijednost ponovljivosti r je vrijednost unutar koje se može očekivati da leži razlika dvaju pojedinačnih rezultata mjerenja dobivena uz uvjete ponovljivosti, uz vjerojatnost 95%.

Kritična razlika ponovljivosti $C_r D_r$ je vrijednost unutar koje se može očekivati da leži razlika dvaju pojedinačnih rezultata ispitivanja dobivena uz uvjete ponovljivosti sa specificiranom vjerojatnosti.

Mjerna obnovljivost je bliskost slaganja rezultata mjerenja iste veličine dobivenih u uvjetima obnovljivosti.

Uvjeti obnovljivosti su uvjeti kod kojih su rezultati dobiveni istom metodom na istom objektu, ali uz različite okolnosti ispitivanja kao što su: različiti mjeritelji, različiti mjerni instrumenti, oprema, različiti alati, vrijeme mjerenja, stalni okolišni uvjeti.

Mjerna vrijednost obnovljivosti **R** je vrijednost unutar koje se može očekivati da leži apsolutna razika između dva mjerenja, dobivena uz uvjete obnovljivosti, uz vjerojatnost 95%.

Kritična razlika obnovljivosti **C_rD_R** je vrijednost unutar koje se može očekivati da leži apsolutna razlika između dva rezultata ispitivanja, dobivena uz uvjete obnovljivosti sa specificiranom vjerojatnosti.

Da bi utvrdili da li su rezultati ponovljivi ili obnovljivi potrebno je prije toga izračunati potrebne vrijednosti koje su nam potrebne.

U tablici 8. vidimo aritmetičke sredine i standardna odstupanja rezultata mjerenja za sedam etalona hrapavosti.

Tablica 8. Aritmetičke sredine i standardna odstupanja sedam etalona hrapavosti

	Epival	Perthometar	AFM	Zygo	Elipsometar	Talystep
6 – 2G						
\bar{x}	110	109	103	109	110	106
s	2	2,7	3,1	0,8	1,9	0,41
4 – H						
\bar{x}	239	242	228	244	240	241
s	2,4	4,1	3,9	1,0	0,8	0,5
YR06507						
\bar{x}	872	856	790	859	847	861
s	7,4	2,0	23	4,9	0,5	0,3
6 – 2M						
\bar{x}	1667	1652	1477	1658	1652	1656
s	7,6	8,3	8,2	2,8	0,5	0,7
3 – 2M						
\bar{x}	2167	2169	1888	2170	2153	2167
s	13,4	8,7	19,3	5,9	0,7	0,6
1X17402						
\bar{x}	2700	2736	2327	2738	2720	2738
s	27,5	9,3	65	4,4	0,9	0,8
3 – 2K						
\bar{x}	4179	4145	3298	4146	4129	4155
s	43,7	11,1	45,3	13,3	3,7	1,1

Etalon 6 – 2G

$\overline{X}_1 = 110 \text{ nm}$	$s_1 = 2 \text{ nm}$
$\overline{X}_2 = 109 \text{ nm}$	$s_2 = 2,7 \text{ nm}$
$\overline{X}_3 = 103 \text{ nm}$	$s_3 = 3,1 \text{ nm}$
$\overline{X}_4 = 109 \text{ nm}$	$s_4 = 0,8 \text{ nm}$
$\overline{X}_5 = 110 \text{ nm}$	$s_5 = 1,9 \text{ nm}$
$\overline{X}_6 = 106 \text{ nm}$	$s_6 = 0,41 \text{ nm}$

Nakon toga pristupamo izračunu varijance ponovljivosti i to prema izrazu:

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)}$$

$$S_r = 2,054$$

Varijanca obnovljivosti S_R^2 jednaka je:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

Za S_R^2 potrebno je izračunati i međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$\overline{\overline{x}} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p X_i$$

$$\overline{\overline{x}} = 107,83$$

Sada možemo izračunati S_D^2 :

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$S_D = 27,707$$

Sada možemo izračunati međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_L = 3,9453$$

Sada kada imamo izračunate vrijednosti S_L^2 i S_r^2 možemo izračunati varijancu obnovljivosti:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

$$S_R^2 = 19,78524$$

$$S_R = 4,448$$

Kada imamo sve ove vrijednosti idemo izračunati mjernu vrijednost ponovljivosti r i mjernu vrijednost obnovljivosti R :

$$r = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_r$$

$$r = 5,6939$$

$$R = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_R$$

$$R = 12,3294$$

Sada možemo pristupiti rješavanju kritične razlike ponovljivosti $C_r D_r$ te kritične razlike obnovljivosti $C_r D_R$:

Kritična razlika ponovljivosti $C_r D_r$:

$$C_r D_r \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \frac{r}{\sqrt{n_i}}$$

$$C_r D_r \cdot (7) = 1,0396$$

$$C_r D_r \cdot (7) > 1,0396$$

Kritična razlika obnovljivosti $C_r D_R$:

$$C_r D_R \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \sqrt{R^2 - r^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n_i}\right)}$$

$$C_r D_R \cdot (7) = 11,019$$

$$C_r D_R \cdot (7) < 11,019$$

Iz ovih rezultata možemo zaključiti da su rezultati dobiveni mjerenjem obnovljivi ali ne zadovoljavaju uvijek ponovljivosti

Etalon 4 – H

$$\overline{X}_1 = 239 \text{ nm} \quad s_1 = 2,4 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_2 = 242 \text{ nm} \quad s_2 = 4,1 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_3 = 228 \text{ nm} \quad s_3 = 3,9 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_4 = 244 \text{ nm} \quad s_4 = 1,0 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_5 = 240 \text{ nm} \quad s_5 = 0,8 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_6 = 241 \text{ nm} \quad s_6 = 0,5 \text{ nm}$$

Nakon toga pristupamo izračunu varijance ponovljivosti i to prema izrazu:

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)}$$

$$S_r = 2,571$$

Varijanca obnovljivosti S_R^2 jednaka je:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

Za S_R^2 potrebno je izračunati i međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$\overline{\overline{x}} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p X_i$$

$$\overline{\overline{x}} = 239$$

Sada možemo izračunati S_D^2 :

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$S_D = 30,984$$

Sada možemo izračunati međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_L = 5,6373$$

Sada kada imamo izračunate vrijednosti S_L^2 i S_r^2 možemo izračunati varijancu obnovljivosti:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

$$S_R = 6,196$$

Kada imamo sve ove vrijednosti idemo izračunati mjernu vrijednost ponovljivosti **r** i mjernu vrijednost obnovljivosti **R** :

$$r = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_r$$

$$r = 7,127$$

$$R = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_R$$

$$R = 17,17$$

Sada možemo pristupiti rješavanju kritične razlike ponovljivosti **C_rD_r** te kritične razlike obnovljivosti **C_rD_R** :

Kritična razlika ponovljivosti **C_rD_r** :

$$C_r D_r \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \frac{r}{\sqrt{n_i}}$$

$$C_r D_r \cdot (16) = 1,3$$

$$\underline{C_r D_r \cdot (16) > 1,3}$$

Kritična razlika obnovljivosti **C_rD_R** :

$$C_r D_R \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \sqrt{R^2 - r^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n_i}\right)}$$

$$C_r D_R \cdot (16) = 15,679$$

$$\underline{C_r D_R \cdot (16) > 15,679}$$

Iz ovih rezultata možemo zaključiti da rezultati dobiveni mjerenjem nisu obnovljivi niti ne zadovoljavaju uvijet ponovljivosti.

Etalon YR06507

$$\overline{X}_1 = 872 \text{ nm} \quad s_1 = 7,4 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_2 = 856 \text{ nm} \quad s_2 = 2,0 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_3 = 790 \text{ nm} \quad s_3 = 23 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_4 = 859 \text{ nm} \quad s_4 = 4,9 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_5 = 847 \text{ nm} \quad s_5 = 0,5 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_6 = 861 \text{ nm} \quad s_6 = 0,3 \text{ nm}$$

Nakon toga pristupamo izračunu varijance ponovljivosti i to prema izrazu:

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)}$$

$$S_r = 10,1$$

Varijanca obnovljivosti S_R^2 jednaka je:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

Za S_R^2 potrebno je izračunati i međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$\overline{\overline{x}} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p X_i$$

$$\overline{\overline{x}} = 847,5$$

Sada možemo izračunati S_D^2 :

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$S_D = 160,5$$

Sada možemo izračunati međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_L = 29,245$$

Sada kada imamo izračunate vrijednosti S_L^2 i S_r^2 možemo izračunati varijancu obnovljivosti:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

$$S_R = 30,94$$

Kada imamo sve ove vrijednosti idemo izračunati mjernu vrijednost ponovljivosti **r** i mjernu vrijednost obnovljivosti **R** :

$$r = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_r$$

$$r = 27,99$$

$$R = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_R$$

$$R = 85,76$$

Sada možemo pristupiti rješavanju kritične razlike ponovljivosti **C_rD_r** te kritične razlike obnovljivosti **C_rD_R** :

Kritična razlika ponovljivosti **C_rD_r** :

$$C_r D_r \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \frac{r}{\sqrt{n_i}}$$

$$C_r D_r \cdot (82) = 5,11$$

$$\underline{C_r D_r \cdot (82) > 5,11}$$

Kritična razlika obnovljivosti **C_rD_R** :

$$C_r D_R \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \sqrt{R^2 - r^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n_i}\right)}$$

$$C_r D_R \cdot (82) = 81,22$$

$$\underline{C_r D_R \cdot (82) > 81,22}$$

Iz ovih rezultata možemo zaključiti da rezultati dobiveni mjerenjem nisu obnovljivi niti ne zadovoljavaju uvijet ponovljivosti.

Etalon 6 – 2M

$$\overline{X}_1 = 1667 \text{ nm} \quad s_1 = 7,6 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_2 = 1652 \text{ nm} \quad s_2 = 8,3 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_3 = 1477 \text{ nm} \quad s_3 = 8,2 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_4 = 1658 \text{ nm} \quad s_4 = 2,8 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_5 = 1652 \text{ nm} \quad s_5 = 0,5 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_6 = 1656 \text{ nm} \quad s_6 = 0,7 \text{ nm}$$

Nakon toga pristupamo izračunu varijance ponovljivosti i to prema izrazu:

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) s_{ij}^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)}$$

$$S_r = 5,809$$

Varijanca obnovljivosti S_R^2 jednaka je:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

Za S_R^2 potrebno je izračunati i međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$\overline{\overline{x}} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p X_i$$

$$\overline{\overline{x}} = 1627$$

Sada možemo izračunati S_D^2 :

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$S_D = 403,624$$

Sada možemo izračunati međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_L = 73,683$$

Sada kada imamo izračunate vrijednosti S_L^2 i S_r^2 možemo izračunati varijancu obnovljivosti:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

$$S_R = 73,91$$

Kada imamo sve ove vrijednosti idemo izračunati mjernu vrijednost ponovljivosti **r** i mjernu vrijednost obnovljivosti **R** :

$$r = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_r$$

$$r = 16,1$$

$$R = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_R$$

$$R = 204,87$$

Sada možemo pristupiti rješavanju kritične razlike ponovljivosti **C_rD_r** te kritične razlike obnovljivosti **C_rD_r** :

Kritična razlika ponovljivosti **C_rD_r** :

$$C_r D_r \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \frac{r}{\sqrt{n_i}}$$

$$C_r D_r \cdot (190) = 2,939$$

$$\underline{C_r D_r \cdot (190) > 2,939}$$

Kritična razlika obnovljivosti **C_rD_R** :

$$C_r D_R \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \sqrt{R^2 - r^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n_i}\right)}$$

$$C_r D_R \cdot (190) = 204,262$$

$$\underline{C_r D_R \cdot (190) < 204,262}$$

Iz ovih rezultata možemo zaključiti da su rezultati dobiveni mjerenjem obnovljivi ali ne zadovoljavaju uvijek ponovljivosti.

Etalon 3 – 2M

$$\overline{X}_1 = 2167 \text{ nm} \quad s_1 = 13,4 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_2 = 2169 \text{ nm} \quad s_2 = 8,7 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_3 = 1888 \text{ nm} \quad s_3 = 19,3 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_4 = 2170 \text{ nm} \quad s_4 = 5,9 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_5 = 2153 \text{ nm} \quad s_5 = 0,7 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_6 = 2167 \text{ nm} \quad s_6 = 0,6 \text{ nm}$$

Nakon toga pristupamo izračunu varijance ponovljivosti i to prema izrazu:

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)}$$

$$S_r = 10,515$$

Varijanca obnovljivosti S_R^2 jednaka je:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

Za S_R^2 potrebno je izračunati i međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$\overline{\overline{x}} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \overline{X}_i$$

$$\overline{\overline{x}} = 2119$$

Sada možemo izračunati S_D^2 :

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$S_D = 620,77$$

Sada možemo izračunati međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_L = 113,32$$

Sada kada imamo izračunate vrijednosti S_L^2 i S_r^2 možemo izračunati varijancu obnovljivosti:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

$$S_R = 113,807$$

Kada imamo sve ove vrijednosti idemo izračunati mjernu vrijednost ponovljivosti **r** i mjernu vrijednost obnovljivosti **R** :

$$r = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_r$$

$$r = 29,146$$

$$R = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_R$$

$$R = 315,457$$

Sada možemo pristupiti rješavanju kritične razlike ponovljivosti **C_rD_r** te kritične razlike obnovljivosti **C_rD_R** :

Kritična razlika ponovljivosti **C_rD_r** :

$$C_r D_r \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \frac{r}{\sqrt{n_i}}$$

$$C_r D_r \cdot (282) = 5,321$$

$$\underline{C_r D_r \cdot (282) > 5,321}$$

Kritična razlika obnovljivosti **C_rD_R** :

$$C_r D_R \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \sqrt{R^2 - r^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n_i}\right)}$$

$$C_r D_R \cdot (282) = 314,153$$

$$\underline{C_r D_R \cdot (282) < 314,153}$$

Iz ovih rezultata možemo zaključiti da su rezultati dobiveni mjerenjem obnovljivi ali ne zadovoljavaju uvijek ponovljivosti.

Etalon 1X17402

$$\overline{X}_1 = 2700 \text{ nm} \quad s_1 = 27,5 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_2 = 2736 \text{ nm} \quad s_2 = 9,3 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_3 = 2327 \text{ nm} \quad s_3 = 65 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_4 = 2738 \text{ nm} \quad s_4 = 4,4 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_5 = 2720 \text{ nm} \quad s_5 = 0,9 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_6 = 2738 \text{ nm} \quad s_6 = 0,8 \text{ nm}$$

Nakon toga pristupamo izračunu varijance ponovljivosti i to prema izrazu:

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) s_{ij}^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)}$$

$$S_r = 29,122$$

Varijanca obnovljivosti S_R^2 jednaka je:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

Za S_R^2 potrebno je izračunati i međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$\overline{\overline{x}} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \overline{X}_i$$

$$\overline{\overline{x}} = 2659,83$$

Sada možemo izračunati S_D^2 :

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$S_D = 894,537$$

Sada možemo izračunati međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_L = 163,233$$

Sada kada imamo izračunate vrijednosti S_L^2 i S_r^2 možemo izračunati varijancu obnovljivosti:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

$$S_R = 165,81$$

Kada imamo sve ove vrijednosti idemo izračunati mjernu vrijednost ponovljivosti **r** i mjernu vrijednost obnovljivosti **R** :

$$r = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_r$$

$$r = 80,722$$

$$R = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_R$$

$$R = 459,603$$

Sada možemo pristupiti rješavanju kritične razlike ponovljivosti **C_rD_r** te kritične razlike obnovljivosti **C_rD_R** :

Kritična razlika ponovljivosti **C_rD_r** :

$$C_r D_r \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \frac{r}{\sqrt{n_i}}$$

$$C_r D_r \cdot (411) = 14,737$$

$$\underline{C_r D_r \cdot (411) > 14,737}$$

Kritična razlika obnovljivosti **C_rD_R** :

$$C_r D_R \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \sqrt{R^2 - r^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n_i}\right)}$$

$$C_r D_R \cdot (411) = 452,698$$

$$\underline{C_r D_R \cdot (411) < 452,698}$$

Iz ovih rezultata možemo zaključiti da su rezultati dobiveni mjerenjem obnovljivi ali ne zadovoljavaju uvijek ponovljivosti.

Etalon 3 – 2K

$$\overline{X}_1 = 4179 \text{ nm} \quad s_1 = 43,7 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_2 = 4145 \text{ nm} \quad s_2 = 11,1 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_3 = 3298 \text{ nm} \quad s_3 = 45,3 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_4 = 4146 \text{ nm} \quad s_4 = 13,3 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_5 = 4129 \text{ nm} \quad s_5 = 3,7 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_6 = 4155 \text{ nm} \quad s_6 = 1,1 \text{ nm}$$

Nakon toga pristupamo izračunu varijance ponovljivosti i to prema izrazu:

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)}$$

$$S_r = 26,698$$

Varijanca obnovljivosti S_R^2 jednaka je:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

Za S_R^2 potrebno je izračunati i međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{x})^2$$

$$\overline{X} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p X_i$$

$$\overline{X} = 4008,67$$

Sada možemo izračunati S_D^2 :

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{x})^2$$

$$S_D = 1909$$

Sada možemo izračunati međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_L = 348,498$$

Sada kada imamo izračunate vrijednosti S_L^2 i S_r^2 možemo izračunati varijancu obnovljivosti:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

$$S_R = 349,519$$

Kada imamo sve ove vrijednosti idemo izračunati mjernu vrijednost ponovljivosti **r** i mjernu vrijednost obnovljivosti **R** :

$$r = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_r$$

$$r = 74$$

$$R = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_R$$

$$R = 968,817$$

Sada možemo pristupiti rješavanju kritične razlike ponovljivosti **C_rD_r** te kritične razlike obnovljivosti **C_rD_R** :

Kritična razlika ponovljivosti **C_rD_r** :

$$C_r D_r \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \frac{r}{\sqrt{n_i}}$$

$$C_r D_r \cdot (881) = 13,51$$

$$\underline{C_r D_r \cdot (881) > 13,51}$$

Kritična razlika obnovljivosti **C_rD_R** :

$$C_r D_R \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \sqrt{R^2 - r^2} \cdot \left(1 - \frac{1}{n_i}\right)$$

$$C_r D_R \cdot (881) = 966$$

$$\underline{C_r D_R \cdot (881) < 966}$$

Iz ovih rezultata možemo zaključiti da su rezultati dobiveni mjerenjem obnovljivi ali ne zadovoljavaju uvijek ponovljivosti.

Nakon postupka procjenjivanja ponovljivosti i obnovljivosti za svaki etalon hrapavosti sukladno normi ISO 5725. Sada ćemo napraviti ponovni postupak procjenjivanja ponovljivosti i obnovljivosti ali na taj način da ću izostaviti rezultate mjerenja dobivenih AFM-om (Mikroskop atomskih sila).

Etalon 6 – 2G

$\overline{X}_1 = 110 \text{ nm}$	$s_1 = 2 \text{ nm}$
$\overline{X}_2 = 109 \text{ nm}$	$s_2 = 2,7 \text{ nm}$
$\overline{X}_3 = 109 \text{ nm}$	$s_4 = 0,8 \text{ nm}$
$\overline{X}_4 = 110 \text{ nm}$	$s_4 = 1,9 \text{ nm}$
$\overline{X}_5 = 106 \text{ nm}$	$s_5 = 0,41 \text{ nm}$

Nakon toga pristupamo izračunu varijance ponovljivosti i to prema izrazu:

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) s_{ij}^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)}$$

$$S_r = 1,772$$

Varijanca obnovljivosti S_R^2 jednaka je:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

Za S_R^2 potrebno je izračunati i međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{x})^2$$

$$\overline{X} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p X_i$$

$$\overline{X} = 108,8$$

Sada možemo izračunati S_D^2 :

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{x})^2$$

$$S_D = 9$$

Sada možemo izračunati međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_L = 1,611$$

Sada kada imamo izračunate vrijednosti S_L^2 i S_r^2 možemo izračunati varijancu obnovljivosti:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

$$S_R^2 = 19,78524$$

$$S_R = 4,448$$

Kada imamo sve ove vrijednosti idemo izračunati mjernu vrijednost ponovljivosti r i mjernu vrijednost obnovljivosti R :

$$r = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_r$$

$$r = 4,193$$

$$R = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_R$$

$$R = 6,638$$

Sada možemo pristupiti rješavanju kritične razlike ponovljivosti $C_r D_r$ te kritične razlike obnovljivosti $C_r D_R$:

Kritična razlika ponovljivosti $C_r D_r$:

$$C_r D_r \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \frac{r}{\sqrt{n_i}}$$

$$C_r D_r \cdot (7) = 0,89698$$

$$C_r D_r \cdot (7) > 0,89698$$

Kritična razlika obnovljivosti $C_r D_R$:

$$C_r D_R \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \sqrt{R^2 - r^2} \cdot \left(1 - \frac{1}{n_i}\right)$$

$$C_r D_R \cdot (4) = 11,019$$

$$C_r D_R \cdot (4) < 11,019$$

Iz ovih rezultata možemo zaključiti da su rezultati dobiveni mjerenjem obnovljivi ali ne zadovoljavaju uvijek ponovljivosti

Etalon 4 – H

$$\overline{X}_1 = 239 \text{ nm} \quad s_1 = 2,4 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_2 = 242 \text{ nm} \quad s_2 = 4,1 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_3 = 244 \text{ nm} \quad s_3 = 1,0 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_4 = 240 \text{ nm} \quad s_4 = 0,8 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_5 = 241 \text{ nm} \quad s_5 = 0,5 \text{ nm}$$

Nakon toga pristupamo izračunu varijance ponovljivosti i to prema izrazu:

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) s_{ij}^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)}$$

$$S_r = 2,2117$$

Varijanca obnovljivosti S_R^2 jednaka je:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

Za S_R^2 potrebno je izračunati i međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$\overline{\overline{x}} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p X_i$$

$$\overline{\overline{x}} = 241,2$$

Sada možemo izračunati S_D^2 :

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$S_D = 111$$

Sada možemo izračunati međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_L = 20,2617$$

Sada kada imamo izračunate vrijednosti S_L^2 i S_r^2 možemo izračunati varijancu obnovljivosti:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

$$S_R = 30,382$$

Kada imamo sve ove vrijednosti idemo izračunati mjernu vrijednost ponovljivosti **r** i mjernu vrijednost obnovljivosti **R** :

$$r = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_r$$

$$r = 6,13$$

$$R = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_R$$

$$R = 56,496$$

Sada možemo pristupiti rješavanju kritične razlike ponovljivosti **C_rD_r** te kritične razlike obnovljivosti **C_rD_R** :

Kritična razlika ponovljivosti **C_rD_r** :

$$C_r D_r \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \frac{r}{\sqrt{n_i}}$$

$$C_r D_r \cdot (5) = 1,119$$

$$\underline{C_r D_r \cdot (5) > 1,119}$$

Kritična razlika obnovljivosti **C_rD_R** :

$$C_r D_R \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \sqrt{R^2 - r^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n_i}\right)}$$

$$C_r D_R \cdot (5) = 56,1738$$

$$\underline{C_r D_R \cdot (5) < 56,1738}$$

Iz ovih rezultata možemo zaključiti da su rezultati dobiveni mjerenjem obnovljivi ali ne zadovoljavaju uvijek ponovljivosti

Etalon YR06507

$$\overline{X}_1 = 872 \text{ nm} \quad s_1 = 7,4 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_2 = 856 \text{ nm} \quad s_2 = 2,0 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_3 = 859 \text{ nm} \quad s_3 = 4,9 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_4 = 847 \text{ nm} \quad s_4 = 0,5 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_5 = 861 \text{ nm} \quad s_5 = 0,3 \text{ nm}$$

Nakon toga pristupamo izračunu varijance ponovljivosti i to prema izrazu:

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) s_{ij}^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)}$$

$$S_r = 4,082$$

Varijanca obnovljivosti S_R^2 jednaka je:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

Za S_R^2 potrebno je izračunati i međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$\overline{\overline{x}} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \overline{X}_i$$

$$\overline{\overline{x}} = 859$$

Sada možemo izračunati S_D^2 :

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$S_D = 53,805$$

Sada možemo izračunati međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_L = 9,795$$

Sada kada imamo izračunate vrijednosti S_L^2 i S_r^2 možemo izračunati varijancu obnovljivosti:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

$$S_R = 10,611$$

Kada imamo sve ove vrijednosti idemo izračunati mjernu vrijednost ponovljivosti **r** i mjernu vrijednost obnovljivosti **R** :

$$r = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_r$$

$$r = 11,315$$

$$R = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_R$$

$$R = 29,414$$

Sada možemo pristupiti rješavanju kritične razlike ponovljivosti **C_rD_r** te kritične razlike obnovljivosti **C_rD_R** :

Kritična razlika ponovljivosti **C_rD_r** :

$$C_r D_r \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \frac{r}{\sqrt{n_i}}$$

$$C_r D_r \cdot (25) = 2,065$$

$$\underline{C_r D_r \cdot (25) > 2,065}$$

Kritična razlika obnovljivosti **C_rD_R** :

$$C_r D_R \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \sqrt{R^2 - r^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n_i}\right)}$$

$$C_r D_R \cdot (25) = 27,229$$

$$\underline{C_r D_R \cdot (25) < 27,229}$$

Iz ovih rezultata možemo zaključiti da su rezultati dobiveni mjerenjem obnovljivi ali ne zadovoljavaju uvijek ponovljivosti.

Etalon 6 – 2M

$$\overline{X}_1 = 1667 \text{ nm} \quad s_1 = 7,6 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_2 = 1652 \text{ nm} \quad s_2 = 8,3 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_3 = 1658 \text{ nm} \quad s_3 = 2,8 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_4 = 1652 \text{ nm} \quad s_4 = 0,5 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_5 = 1656 \text{ nm} \quad s_5 = 0,7 \text{ nm}$$

Nakon toga pristupamo izračunu varijance ponovljivosti i to prema izrazu:

$$S_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)}$$

$$S_r = 3,743$$

Varijanca obnovljivosti S_R^2 jednaka je:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

Za S_R^2 potrebno je izračunati i međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$\overline{\overline{x}} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p X_i$$

$$\overline{\overline{x}} = 1657$$

Sada možemo izračunati S_D^2 :

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$S_D = 33,764$$

Sada možemo izračunati međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_L = 6,1264$$

Sada kada imamo izračunate vrijednosti S_L^2 i S_r^2 možemo izračunati varijancu obnovljivosti:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

$$S_R = 7,1794$$

Kada imamo sve ove vrijednosti idemo izračunati mjernu vrijednost ponovljivosti **r** i mjernu vrijednost obnovljivosti **R** :

$$r = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_r$$

$$r = 10,376$$

$$R = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_R$$

$$R = 19,9$$

Sada možemo pristupiti rješavanju kritične razlike ponovljivosti **C_rD_r** te kritične razlike obnovljivosti **C_rD_R** :

Kritična razlika ponovljivosti **C_rD_r** :

$$C_r D_r \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \frac{r}{\sqrt{n_i}}$$

$$C_r D_r \cdot (15) = 1,8944$$

$$\underline{C_r D_r \cdot (15) > 1,8944}$$

Kritična razlika obnovljivosti **C_rD_R** :

$$C_r D_R \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \sqrt{R^2 - r^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n_i}\right)}$$

$$C_r D_R \cdot (15) = 17,086$$

$$\underline{C_r D_R \cdot (15) < 17,086}$$

Iz ovih rezultata možemo zaključiti da su rezultati dobiveni mjerenjem obnovljivi ali ne zadovoljavaju uvijek ponovljivosti.

Etalon 3 – 2M

$$\overline{X}_1 = 2167 \text{ nm} \quad s_1 = 13,4 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_2 = 2169 \text{ nm} \quad s_2 = 8,7 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_3 = 2170 \text{ nm} \quad s_3 = 5,9 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_4 = 2153 \text{ nm} \quad s_4 = 0,7 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_5 = 2167 \text{ nm} \quad s_5 = 0,6 \text{ nm}$$

Nakon toga pristupamo izračunu varijance ponovljivosti i to prema izrazu:

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) s_{ij}^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)}$$

$$S_r = 2,42$$

Varijanca obnovljivosti S_R^2 jednaka je:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

Za S_R^2 potrebno je izračunati i međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$\overline{\overline{x}} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p X_i$$

$$\overline{\overline{x}} = 2165,2$$

Sada možemo izračunati S_D^2 :

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$S_D = 38,026$$

Sada možemo izračunati međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_L = 6,928$$

Sada kada imamo izračunate vrijednosti S_L^2 i S_r^2 možemo izračunati varijancu obnovljivosti:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

$$S_R = 7,33$$

Kada imamo sve ove vrijednosti idemo izračunati mjernu vrijednost ponovljivosti **r** i mjernu vrijednost obnovljivosti **R** :

$$r = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_r$$

$$r = 6,708$$

$$R = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_R$$

$$R = 19,203$$

Sada možemo pristupiti rješavanju kritične razlike ponovljivosti **C_rD_r** te kritične razlike obnovljivosti **C_rD_R** :

Kritična razlika ponovljivosti **C_rD_r** :

$$C_r D_r \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \frac{r}{\sqrt{n_i}}$$

$$C_r D_r \cdot (17) = 0,44$$

$$\underline{C_r D_r \cdot (17) > 0,44}$$

Kritična razlika obnovljivosti **C_rD_R** :

$$C_r D_R \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \sqrt{R^2 - r^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n_i}\right)}$$

$$C_r D_R \cdot (17) = 18,03$$

$$\underline{C_r D_R \cdot (17) < 18,03}$$

Iz ovih rezultata možemo zaključiti da su rezultati dobiveni mjerenjem obnovljivi ali ne zadovoljavaju uvijek ponovljivosti.

Etalon 1X17402

$$\overline{X}_1 = 2700 \text{ nm} \quad s_1 = 27,5 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_2 = 2736 \text{ nm} \quad s_2 = 9,3 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_3 = 2738 \text{ nm} \quad s_3 = 4,4 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_4 = 2720 \text{ nm} \quad s_4 = 0,9 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_5 = 2738 \text{ nm} \quad s_5 = 0,8 \text{ nm}$$

Nakon toga pristupamo izračunu varijance ponovljivosti i to prema izrazu:

$$S_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)}$$

$$S_r = 13,14$$

Varijanca obnovljivosti S_R^2 jednaka je:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

Za S_R^2 potrebno je izračunati i međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$\overline{\overline{x}} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p X_i$$

$$\overline{\overline{x}} = 2726,4$$

Sada možemo izračunati S_D^2 :

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$S_D = 90,796$$

Sada možemo izračunati međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_L = 16,402$$

Sada kada imamo izračunate vrijednosti S_L^2 i S_r^2 možemo izračunati varijancu obnovljivosti:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

$$S_R = 20,02$$

Kada imamo sve ove vrijednosti idemo izračunati mjernu vrijednost ponovljivosti **r** i mjernu vrijednost obnovljivosti **R**:

$$r = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_r$$

$$r = 22,22$$

$$R = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_R$$

$$R = 55,49$$

Sada možemo pristupiti rješavanju kritične razlike ponovljivosti **C_rD_r** te kritične razlike obnovljivosti **C_rD_R**:

Kritična razlika ponovljivosti **C_rD_r**:

$$C_r D_r \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \frac{r}{\sqrt{n_i}}$$

$$C_r D_r \cdot (38) = 4,056$$

$$\underline{C_r D_r \cdot (38) > 4,056}$$

Kritična razlika obnovljivosti **C_rD_R**:

$$C_r D_R \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \sqrt{R^2 - r^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n_i}\right)}$$

$$C_r D_R \cdot (411) = 452,698$$

$$\underline{C_r D_R \cdot (411) < 452,698}$$

Iz ovih rezultata možemo zaključiti da su rezultati dobiveni mjerenjem obnovljivi ali ne zadovoljavaju uvijek ponovljivosti.

Etalon 3 – 2K

$$\overline{X}_1 = 4179 \text{ nm} \quad s_1 = 43,7 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_2 = 4145 \text{ nm} \quad s_2 = 11,1 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_3 = 4146 \text{ nm} \quad s_3 = 13,3 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_4 = 4129 \text{ nm} \quad s_4 = 3,7 \text{ nm}$$

$$\overline{X}_5 = 4155 \text{ nm} \quad s_5 = 1,1 \text{ nm}$$

Nakon toga pristupamo izračunu varijance ponovljivosti i to prema izrazu:

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) s_{ij}^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)}$$

$$S_r = 21,09$$

Varijanca obnovljivosti S_R^2 jednaka je:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

Za S_R^2 potrebno je izračunati i međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$\overline{\overline{x}} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p X_i$$

$$\overline{\overline{x}} = 4150,8$$

Sada možemo izračunati S_D^2 :

$$S_D^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p n_i \cdot (x_i - \overline{\overline{x}})^2$$

$$S_D = 100,429$$

Sada možemo izračunati međulaboratorijsko standardno odstupanje S_L^2 :

$$S_L^2 = \frac{S_D^2 - S_r^2}{n}; S_L = \sqrt{\frac{S_D^2 - S_r^2}{n}}$$

$$S_L = 17,927$$

Sada kada imamo izračunate vrijednosti S_L^2 i S_r^2 možemo izračunati varijancu obnovljivosti:

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2$$

$$S_R = 27,679$$

Kada imamo sve ove vrijednosti idemo izračunati mjernu vrijednost ponovljivosti **r** i mjernu vrijednost obnovljivosti **R** :

$$r = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_r$$

$$r = 58,458$$

$$R = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_R$$

$$R = 76,72$$

Sada možemo pristupiti rješavanju kritične razlike ponovljivosti **C_rD_r** te kritične razlike obnovljivosti **C_rD_R** :

Kritična razlika ponovljivosti **C_rD_r** :

$$C_r D_r \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \frac{r}{\sqrt{n_i}}$$

$$C_r D_r \cdot (50) = 10,673$$

$$\underline{C_r D_r \cdot (50) > 10,673}$$

Kritična razlika obnovljivosti **C_rD_R** :

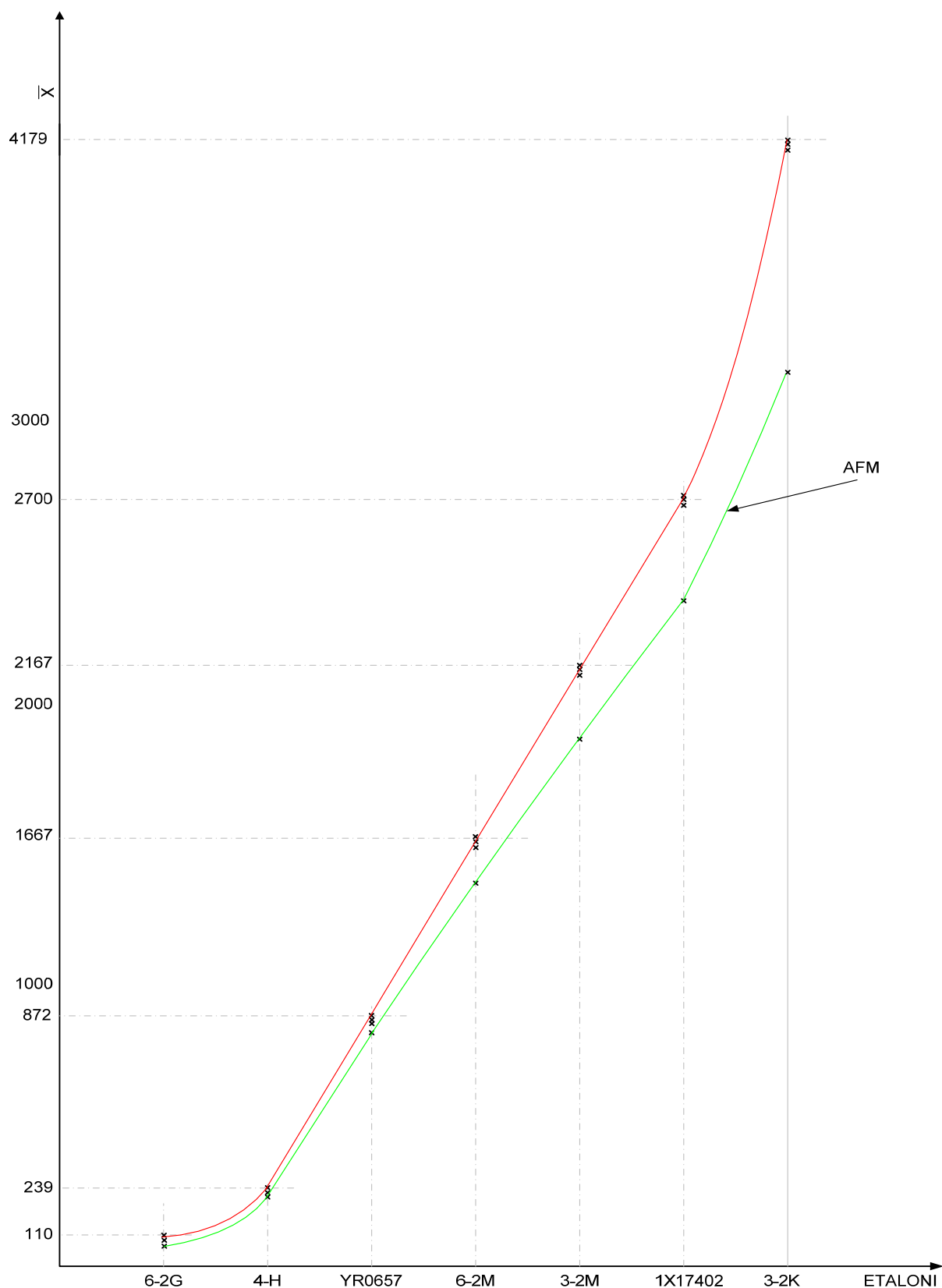
$$C_r D_R \cdot (|\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}|) = \sqrt{R^2 - r^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n_i}\right)}$$

$$C_r D_R \cdot (50) = 50,83$$

$$\underline{C_r D_R \cdot (50) < 50,83}$$

Iz ovih rezultata možemo zaključiti da su rezultati dobiveni mjerenjem obnovljivi ali ne zadovoljavaju uvijek ponovljivosti.

5. ZAKLJUČAK DONESEN NA TEMELJU REZULTATA STVARNIH MJERENJA ETALONA HRPAVOSTI



Slika 3.8. Analiza rezultata mjerenja etalona hrapavosti

Provedenom analizom rezultata mjerenja etalona hrapavosti koja je prikazana na (slici 3.8.) vidimo da vrijednosti koje su mjerene AFM-om (Mikroskopom atomskih sila) imaju sustavni pomak u odnosu na ostale metode. Za pretpostaviti je da je uređaj krivo umjeren.

Kako je u uvodu bilo naglašeno mjernom jedinstvu, kao zaključak možemo reći da je cilj osigurati to mjerno jedinstvo. A da se osigura mjerno jedinstvo treba prvo osigurati sustav sljedivosti i umjeravanja. Do sada su bili etaloni koji su bili podređeni svim metodama mjerenja, sada treba raditi na razvoju novih etalona prikladnih za osiguranje sljedivosti i umjeravanja. Treba postojati i mogućnost usporedivosti s etalonima. Kod umjeravanja i sljedivosti treba reći to da modeli koji su za procjenu nesigurnosti trebaju se razvijati za različite tipove mjernih principa i uređaja, te da međunarodne usporedbe trebaju ojačati s ciljem dobivanja zajedničke osnove za vrednovanje novih mjernih postupaka kao i nesigurnosti.

Na kraju ću spomenuti i tehnologija čistoće uzoraka koja je također vrlo važna jer učinak onečišćenja u tim redovima veličine skroz poništava rezultate mjerenja.

6. LITERATURA

materijali i predavanja iz kolegija "Nanomjeriteljstvo"

materijali i predavanja iz kolegija "Teorija i tehnika mjerenja"

www.zygo.com

www.entrepix.com/Rudolph/AutoEL/AutoEL-3.html

www.taylor-hobson.com

web materijali